This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

HN 4Q3Z M

KF 24551

Harvard College Library

FROM

Library of Congress

8 Aug 1898

ANNALES DE L'UNIVERSITÉ DE LYON
Fasc. XXXV

ÉTUDE
DU
CHAMP ÉLECTRIQUE
DE L'ATMOSPHÈRE

PAR

Georges LE CADET
Docteur ès Sciences,
Assistant à l'Observatoire de Lyon.

Avec 3 figures et 10 planches intercalées dans le texte

PARIS
LIBRAIRIE J.-B. BAILLIÈRE et FILS
19, Rue Hautefeuille

LYON
A. REY, IMPRIMEUR-ÉDITEUR
Rue Gentil, 4

1898

AUTRES OUVRAGES DE LA COLLECTION

EN VENTE

A LYON	A PARIS
Alexandre REY, Imprimeur-Éditeur	**Chez les Libraires spéciaux**
4, RUE GENTIL	SUIVANTS

Librairie Arthur ROUSSEAU, 14, rue Soufflot.

Histoire de la Compensation en droit Romain, par C. APPLETON, professeur à la Faculté de droit. . . . . 7 fr. 50

Caractères généraux de la loi de 1884 sur les Syndicats professionnels; justification de cette loi; réformes possibles. Étude de législation industrielle, par René GOSSNARD, docteur en droit, licencié ès lettres, secrétaire à la Société d'Économie Politique, avec une Préface de M. P. PIC, professeur à la Faculté de Droit. . . 3 fr.

Librairie Félix ALCAN, 108, boulevard Saint-Germain.

Lettres intimes de J.-M. Alberoni adressées au comte I. Rocca, ministre des finances du duc de Parme, et publiées d'après le manuscrit du collège de S. Lazaro Alberoni, par Emile BOURGEOIS, maître de conférences à l'École Normale, avec un portrait et deux fac-simile. . . . 10 fr.

Essai critique sur l'hypothèse des atomes dans la science contemporaine, par Arthur HANNEQUIN, professeur à la Faculté des Lettres . . . . . 7 fr. 50

Saint Ambroise et la morale chrétienne au IVe siècle, par Raymond TRAMIN, ancien maître de conférences à la Faculté des Lettres de Lyon, professeur au lycée Condorcet. . . . . 7 fr. 50

La République des Provinces-Unies, la France et les Pays-Bas espagnols de 1630 à 1650, par A. WANNINGTON, professeur à la Faculté des Lettres.

Tome I (1630-42). 1 vol . . . . . 6 fr.

Tome II (1642-50) avec deux portraits et une carte. 1 vol. . . . . 6 fr.

Librairie Alphonse PICARD et Fils, 82, rue Bonaparte.

La doctrine de Malherbe d'après son commentaire sur Desportes, par Ferdinand BRUNOT, maître de conférences à la Faculté des Lettres de l'Université de Paris, avec 5 planches hors texte . . . 10 fr.

Le Fondateur de Lyon, Histoire de L. Munatius Plancus, par M. JULLIEN, professeur à la Faculté des Lettres, avec une planche hors texte . . . . . 5 fr.

La Jeunesse de William Wordsworth (1770-1798). **Étude sur le « Prélude »,** par Emile LEGOUIS, professeur à la Faculté des Lettres . . . . . 7 fr. 50

Librairie Ernest LEROUX, 28, rue Bonaparte.

Phonétique historique et comparée du sanscrit et du zend, par Paul REGNAUD, professeur à la Faculté des Lettres . 5 fr.

L'évolution d'un Mythe. Açvins et Dioscures, par Ch. RENEL, maître de conférences à la Faculté des Lettres de Besançon 6 fr.

Librairie GAUTHIER-VILLARS, 55, quai des Grands-Augustins.

Sur la théorie des équations différentielles du premier ordre et du premier degré, par Léon AUTONNE, ingénieur des Ponts et Chaussées, chargé de cours à la Faculté des Sciences . . . . . 9 fr.

Recherches sur l'équation personnelle dans les observations astronomiques de passages, par F. GONNESSIAT, aide-Astronome à l'Observatoire, chargé d'un Cours complémentaire à la Faculté des Sciences. . . . . 5 fr.

Recherches sur quelques dérivés surchlorés du phénol et du benzène, par Etienne BARRAL, professeur agrégé à la Faculté de médecine . . . . . 5 fr.

(Suite à la page 3.)

ÉTUDE

DU

CHAMP ÉLECTRIQUE

DE L'ATMOSPHÈRE

Lyon. — Imp. Pitrat Aîné, A. Rey Succ., 4, rue Gentil. — 17067

Exemplaire N° 29

ANNALES DE L'UNIVERSITÉ DE LYON
Fasc. XXXV

ÉTUDE
DU
CHAMP ÉLECTRIQUE
DE L'ATMOSPHÈRE

PAR
Georges LE CADET
Docteur ès Sciences,
Assistant à l'Observatoire de Lyon.

Avec 3 figures et 10 planches intercalées dans le texte

PARIS
LIBRAIRIE J.-B. BAILLIÈRE et FILS
19, Rue Hautefeuille

LYON
A. REY, IMPRIMEUR-ÉDITEUR
Rue Gentil, 4

1898

~~ThG 5408.72~~
KF 2451

AUG 2 1888
CAMBRIDGE, MASS.

The Libry. of the University

A MON MAITRE

M. LE PROFESSEUR CH. ANDRÉ

Directeur de l'Observatoire de Lyon.

Hommage de profonde reconnaissance
et de respectueux attachement.

G. LE CADET.

ÉTUDE

DU

CHAMP ÉLECTRIQUE

DE L'ATMOSPHÈRE

INTRODUCTION

I. — EXPOSÉ DE LA QUESTION

1. Nous ne savons pas ce que c'est que l'électricité atmosphérique : si c'est l'électricité de la terre ou l'électricité de l'air, de la vapeur d'eau ou d'autres particules de l'air. Mais quelle que soit la distribution des masses électriques qui agissent sur les appareils, qu'elles résident à la surface du sol ou dans les régions supérieures de l'atmosphère ou qu'elles soient disséminées dans toute son étendue, il y a en chaque point un *potentiel* déterminé.

D'ailleurs, la seule quantité qui soit définie et qui soit déterminable — avec plus ou moins de précision — au moyen des instruments, c'est la différence de potentiel qui existe entre un point de l'atmosphère et le sol ou entre deux points de l'atmosphère ou encore entre deux points du sol.

2. Or, si l'on compare les différences de potentiel trouvées, dans les circonstances ordinaires, autour d'un point donné, sur la surface même du sol et sur une normale extérieure à cette surface, on voit que les premières sont absolument négligeables vis-à-vis des dernières. Les mesures des courants

telluriques montrent que ces courants correspondent à des déplacements de quantités assez grandes d'électricité sous des différences de potentiel très faibles. Ainsi, d'après M. Preece[1], pendant les plus remarquables tempêtes électriques de l'année 1892, par exemple, les plans équipotentiels différents de 1 volt furent trouvés distants d'environ 3600 mètres, ce qui créait sur la ligne d'étude un courant de plus de 45 milliampères, c'est-à-dire plus intense que celui des signaux télégraphiques. En temps ordinaire, c'est sur une distance de plus d'une centaine de kilomètres que l'on constate des différences de 1 volt.

D'autre part, entre un point de la surface horizontale du sol et un point de l'air libre, l'électromètre accuse normalement une différence de potentiel qui dépasse 100 volts par mètre.

3. On doit donc admettre que la surface extérieure de la terre, déterminée par tous les corps conducteurs en communication avec elle, forme à chaque instant une surface de niveau par rapport aux masses électriques existant tant à l'intérieur qu'à l'extérieur du globe, et cela quelles que soient la quantité et la distribution de ces masses dans les conditions atmosphériques ordinaires[2].

4. Par conséquent, lorsqu'on mesure la différence de potentiel V entre un point d'une portion plane et unie du sol et un point de l'air distant normalement de m mètres, le quotient $\frac{V}{m}$ réprésente la valeur de la composante normale $\frac{dV}{dn}$ du champ électrique due aux masses influentes en ce point. Toutes les opérations faites *à la surface de la terre* se rapportent à cette notion, c'est-à-dire en définitive d'après le théorème de

[1] Preece, communication faite à l'Association britannique pour l'avancement des Sciences, le 9 août 1892, *Ciel et Terre*, 13e année, p. 337.

[2] Je spécifie à dessein ces conditions, car la surface terrestre n'est pas conductrice au même degré qu'une surface métallique. On sait, en effet, avec quel soin l'on doit assurer un intime contact des câbles métalliques des paratonnerres avec le sol pour qu'il ne subsiste, en cas d'orage, aucune différence de potentiel entre ces câbles et les objets qui font partie de la surface de la terre.

Coulomb $\left(\frac{dV}{dn} = -4\pi\mu\right)$, à la détermination du signe et de la densité μ de la charge électrique du sol au point considéré.

5. Or, cette densité μ peut provenir de la superposition de deux états électriques dépendants l'un d'une charge propre du globe, l'autre d'une charge induite par des masses extérieures ou bien provenir d'un seul de ces deux états, et c'est ce qu'une observation isolée ne peut décider. Il résulte, en effet, du théorème de Green qu'il est impossible de déduire l'état électrique d'un corps non conducteur (l'atmosphère) des actions qu'il exerce à l'extérieur (la surface du sol), car il existe une infinité de distributions d'une même masse électrique dans un espace déterminé, qui sont capables de donner à l'extérieur les mêmes surfaces de niveau et, par suite, la même force en chaque point.

6. Cependant l'observation continuée dans le même lieu à des instants différents, ou faite au même instant en différents lieux, révèle dans l'une et l'autre condition des changements de densité et parfois même de signe. Ainsi, il est établi que :

1° Dans le même lieu, ces variations sont de deux sortes : les unes périodiques et apparemment régulières, les autres accidentelles, brusques et parfois considérables ; les premières se manifestant surtout par beau temps — air calme et ciel serein — sans cependant exclure complètement les secondes qui prennent le véritable caractère de perturbations par temps troublé (orage, pluie, neige, grêle ou brouillard).

2° Au même instant, par beau temps et sur une portion *peu étendue* de la surface du sol couverte d'accidents de toute nature, la densité est plus grande sur les parties proéminentes et les surfaces convexes, plus faible sur les parties abritées et concaves, nulle sur les parois d'une cavité ou d'un appartement et uniforme sur les parties horizontales, planes et unies.

Quant au signe de la densité, il est normalement négatif ; il ne devient positif que rarement par beau temps, mais il l'est fréquemment par temps orageux ou pluvieux.

7. Or, la simple considération de ces phénomènes ne suffit point pour décider la question du siège et de l'origine de l'électricité naturelle ; tout au plus pouvons-nous, d'après cela, comme l'a fait Sir W. Thomson[1], limiter à la hauteur de notre atmosphère le lieu d'origine des manifestations électriques de la surface terrestre.

Aussi a-t-on été amené, dès le début de cette étude, à faire des hypothèses qui, tout en rendant compte des phénomènes connus, devaient en même temps guider les observateurs dans la recherche de faits nouveaux ou plus précis.

8. Pour l'explication du signe normal de l'électricité constatée à la surface de la terre, toutes les théories ont dû reconnaître l'existence d'une couche négative sur le sol; de plus, pour l'explication des variations, toutes ont dû admettre la présence de masses électriques dans l'atmosphère et toutes ont fait naturellement jouer le plus grand rôle à l'élément conducteur eau dans ses divers états physiques naturels. Mais avec ces points communs elles présentent entre elles des différences essentielles qui peuvent les faire grouper en deux classes :

La première contenant les théories nombreuses qui admettent la production continue d'électricité, par un des modes de l'énergie actuelle en action sur notre planète. Dans ce cas, il y a toujours nécessairement production équivalente d'électricité négative et d'électricité positive ; la première se portant en général sur le sol et la seconde restant dans l'atmosphère ; de sorte que l'action d'ensemble est nulle sur un point extérieur à la planète.

La deuxième comprenant les théories qui dépendent de l'hypothèse d'une charge négative originelle invariable de la planète.

9. Ces deux classes de théories se distinguent par le signe des masses électriques qu'elles placent dans le champ de l'atmosphère pour rendre compte des variations régulières.

[1] W. Thomson, *Reprints of papers*, p. 198.

Dans les théories de la première classe, les variations du potentiel à la surface de la terre sont considérées comme dues à la production corrélative de l'électricité *positive* de l'atmosphère ou comme le résultat de déplacements des masses *positives* préalablement formées.

Quant aux théories de la deuxième classe, elles reconnaissent essentiellement la présence dans l'atmosphère de masses *négatives* empruntées à la charge du globe ; l'ensemble représentant l'excès d'électricité négative propre à la planète.

10. D'après cette division, un fait général se présente comme le critérium d'une classe de théories : c'est le signe normal des masses influentes répandues dans l'atmosphère. La détermination de ce signe constitue donc un élément de première importance pour le choix de l'hypothèse fondamentale.

On verra que cette détermination ne pouvait pas être considérée comme définitivement faite, quoique certaines théories récentes eussent été édifiées, un peu hâtivement peut-être, sur les résultats obtenus dans cette voie par des observations notoirement insuffisantes.

11. Le présent travail a précisément pour but de fixer, par un examen historique, l'état de la question et de donner les résultats d'expériences personnelles entreprises pour sa solution.

II. — ÉTUDE THÉORIQUE DU CHAMP

12. Tout d'abord les mesures électriques faites à la surface de la terre ne peuvent fournir d'indications utiles qu'à la condition qu'elles soient poursuivies d'une façon continue et simultanée et en des points tellement définis que ces mesures soient réductibles au même niveau. On arriverait ainsi à déterminer la loi de la distribution normale de la densité électrique à la surface du globe. Sir W. Thomson a fait remarquer que la connaissance de cette loi permettrait de décider si l'état électrique du sol dépend ou non de celui de l'air, et dans le premier cas,

permettrait d'assigner une limite supérieure de la distance des masses influentes extérieures.

13. La recherche de cette loi présente de grandes difficultés, car il est presque impossible de déterminer les coefficients de réduction des divers points de la surface accidentée du sol, et nous ne sommes pas en mesure de tracer sur le globe les lignes d'égale densité électrique (réduite au niveau de la mer).

On peut d'ailleurs prévoir que les relations du potentiel et des éléments météorologiques ne seront qu'imparfaitement établies par les seules observations recueillies à la surface de la terre. Étant donné, en effet, que l'état électrique en un point de la surface peut varier, non seulement avec la quantité des masses influentes, mais aussi avec leur distribution dans un rayon très étendu autour du point, il faudrait que l'on connût la distribution des éléments météorologiques à chaque instant tout autour du point, c'est-à-dire aussi bien en hauteur dans l'atmosphère qu'à la surface du sol.

L'étude de l'électricité atmosphérique est ainsi limitée comme celle de la Météorologie générale par notre impuissance à poursuivre dans l'atmosphère elle-même les observations simultanées que nous faisons à la surface de la terre.

14. La détermination de l'état électrique de l'air, c'est-à-dire de la densité et du signe des masses électriques réparties en tous les points de l'atmosphère, ne peut être faite qu'en déterminant dans l'unité de volume autour de chaque point, la force du champ et la variation de cette force. En mesurant les différences de potentiel par unité de longueur et les variations de ces différences qui existent au même instant suivant trois directions rectangulaires, on obtient la somme et le signe des masses comprises dans l'unité de volume, par la formule de Poisson :

$$\rho = -\frac{1}{4\pi}\left(\frac{\Delta^2 V}{\Delta x^2} + \frac{\Delta^2 V}{\Delta y^2} + \frac{\Delta^2 V}{\Delta z^2}\right).$$

Un tel système de mesures déterminerait donc complètement l'état électrique de l'atmosphère à un instant donné.

15. Mais en raison des difficultés pratiques presque insurmontables que présente son application générale, on ne peut songer à l'employer que dans les conditions de distribution régulière, en couches de niveau, que paraît offrir le phénomène par beau temps. Dans ces conditions, en effet, la composante normale Z — que nous désignerons par $\frac{dV}{dn}$ ou F — ayant seule une valeur appréciable, il suffira de déterminer sa valeur et sa variation le long d'une normale à la surface d'un sol uni et découvert pour en déduire :

1° Le signe des masses électriques de l'air : car, d'après la formule simplifiée

$$-4\pi\rho = \frac{d^2V}{dn^2} \text{ ou } 4\pi\rho = \frac{dF}{dn}.$$

ρ est *positif* ou *négatif* suivant que la valeur de la force $F = -\frac{dV}{dn}$ va en *diminuant* ou en *augmentant*.

2° La quantité totale de ces masses comprise entre deux sections d'un cylindre d'air représentant un tube de force du champ terrestre : car, d'après le théorème de Green ($4\pi M = \Sigma F ds$), la somme M des masses résulte de la différence des valeurs trouvées pour la force F au niveau de chaque section.

Si F était constant, ρ serait nul : on devrait conclure qu'il n'y a pas de masses électriques dans la portion d'atmosphère explorée. Dès lors, on devrait admettre que la terre est seule électrisée ou qu'il existe à une hauteur plus grande une couche positive équivalente à la couche négative du sol; ces deux couches représentant, avec l'épaisseur d'air interposée, une sorte de condensateur.

16. On voit que la détermination de la variation du champ avec la hauteur est de nature à nous renseigner sur l'état électrique normal de l'atmosphère et à limiter, par suite, le nombre des théories admissibles pour l'explication des phénomènes observés à la surface de la terre.

845.44 ~~Al 498~~
~~ThG 5408.98~~
KF 2451

AUG 8 1898
CAMBRIDGE, MASS.

The Libry. of the University

A MON MAITRE

M. LE PROFESSEUR CH. ANDRÉ

Directeur de l'Observatoire de Lyon.

Hommage de profonde reconnaissance
et de respectueux attachement.

G. LE CADET.

tion fixe. Ils donnent, par une surveillance attentive de la qualité de l'isolement, de la fixité du point zéro et de la valeur de la graduation, des courbes dont les ordonnées sont proportionnelles aux variations du potentiel électrique en un point de l'air. Ce point est généralement à une certaine hauteur au-dessus du sol et à une certaine distance du mur du bâtiment qui abrite les appareils. C'est le point où se brise le jet d'eau du collecteur par exemple. Or, ce point est mal déterminé au point de vue électrique, car il est difficile de figurer les surfaces de niveau de son voisinage, c'est-à-dire la direction de la force en ce point et impossible, par suite, d'obtenir la valeur de l'intensité de la force du champ électrique terrestre. Il faut pour cela comparer la valeur du potentiel en ce point à celle qu'on obtient au même instant à 1 mètre au-dessus d'une portion peu distante, plane, unie et étendue de la surface du sol, ce qui donne la mesure du champ.

21. Les appareils transportables appartenant au deuxième groupe devront servir à cette comparaison en même temps qu'à l'observation des variations du potentiel en divers lieux éloignés des habitations.

22. Le premier type de ce groupe, donnant des mesures absolues est l'*électromètre portatif de Thomson*. Le modèle primitif et le modèle perfectionné sont décrits par Sir W. Thomson lui-même dans *Reprints of papers*, p. 202, 215 et 292.

M. Angot a d'ailleurs insisté sur les précautions à prendre pour son usage dans l'*Annuaire de la Soc. Mét. de France* pr 1877, p. 165 et suivantes.

Dans le premier modèle on pouvait, soit mesurer la différence de potentiel de deux points de l'air en isolant la cage de l'instrument, soit mesurer le potentiel d'un point par rapport à la Terre. Dans ces deux cas, une charge hétérostatique était entretenue sur l'armature intérieure de la bouteille de Leyde constituant la boîte de l'appareil. On ramenait l'aiguille déviée à un point fixe au moyen d'un tambour de torsion. Le

nombre de degrés de torsion est proportionnel au carré de la différence de potentiel des deux bornes.

Le dernier modèle encore en usage est de la classe des appareils à disque attiré et à anneau de garde. On y mesure, au moyen d'une échelle et d'un tambour à vis micrométrique, la distance de deux plateaux qui est directement proportionnelle à leur différence de potentiel.

Dans cet appareil, comme dans le précédent, on emploie une charge hétérostatique assez forte qui permet d'obtenir en général une grande sensibilité invariable sur une grande étendue. Mais cet avantage précieux est contrebalancé par la difficulté d'isolement qui fait qu'un même appareil ne peut rester que peu de temps comparable à lui-même dans ses indications.

La présence d'acide sulfurique expose en outre à des accidents, au bout d'un certain temps, alors qu'il devient nécessaire de renouveler l'acide ou de griller la ponce ; ce qui ne se peut faire en tous lieux[1].

23. D'ailleurs, la première condition à laquelle doive satisfaire un appareil transportable et utilisable en voyage est de donner constamment des indications facilement comparables entre elles, c'est-à-dire le mieux d'avoir une graduation constante. On s'adressera donc de préférence aux appareils idiostatiques qui ne nécessitent pour cela que l'isolement constant de la charge à mesurer.

C'est ainsi que *M. Fr. Exner*[2] a été conduit à adopter l'électroscope à feuilles d'or ou d'aluminium qu'il a gradué et

[1] J'avais songé à me servir, pour mes expériences, d'un des modèles à torsion que je modifiais pour rendre commode la mesure d'une différence de potentiel de deux points indépendamment du sol. J'ai été dissuadé de ce projet par Lord Kelvin lui-même qui m'honora d'une réponse à la lettre que je lui avais écrite à ce sujet, et qui me conseilla simplement les feuilles d'or ou d'aluminium.

[2] F. Exner, Ueber transportable Apparate zur Beobachtung der atmosphärischen Elektricität *(Sitzungsberichte*, Wien, XCV, p. 1088 (1887).

auquel il a donné la forme essentiellement transportable d'une petite boîte analogue à celle d'un baromètre anéroïde.

L'avantage de l'électroscope à feuilles d'or apparaît surtout dans l'usage des égaliseurs de potentiel ou collecteurs. On a ainsi, sans installation et sans interruption, par l'observation continue des feuilles, « une image saisissante de la variation du potentiel au point correspondant de l'air ».

24. Les conditions que M. Exner a recherchées dans l'établissement de son instrument sont les suivantes :

1° La constance des indications ;

2° Une sensibilité suffisante dans les conditions normales de l'atmosphère : soit, entre 50 et 200 volts, une limite d'erreur de 5 o/o ;

3° La simplicité du principe ;

4° La commodité et le bon marché.

On peut dire que, dans les limites assignées, ces conditions sont pleinement réalisées par la construction suivante[1] :

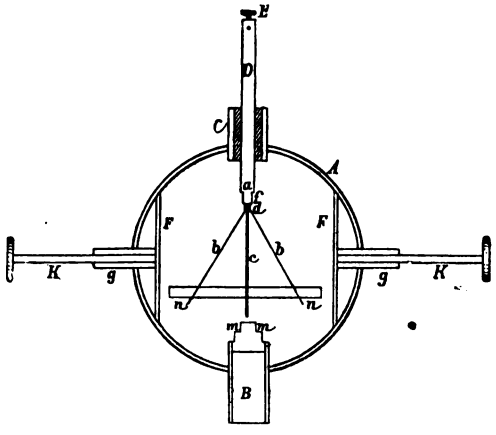
25. Une boîte ronde de laiton A de 5 centimètres de diamètre forme la cage. Celle-ci est fermée sur ses deux faces par deux plateaux de verre ; à la partie inférieure, elle porte une douille de laiton B dans laquelle peut être introduit, comme support à main, un bâton de laiton ou d'ébonite. Au-dessus, c'est-à-dire à l'extrémité supérieure du diamètre vertical, et dans un deuxième tube de cuivre C, est un bouchon d'ébonite[2] que traverse une tige de cuivre D. Bouchon et tige sont solidement fixés. Cette tige est le support des feuilles d'aluminium *b ;* elle établit, au moyen de la borne E qui la termine, la communication avec l'appareil collecteur. La partie inférieure *a* de la tige a une forme particulière, que montre la figure ci-jointe et dont le but est de protéger les feuilles d'aluminium contre tout accident. Les feuilles sont en effet suspendues à un ressaut *d*

[1] Les appareils sont construits par M. Schorss, *Kleine Neugasse*, 13, Wien.

[2] Tous les isolants en ébonite de l'appareil sont recouverts d'un vernis à la gomme laque, à l'aide duquel ils fonctionnent bien par temps humide, d'après M. Exner.

compris entre les bords aplatis *f* de la tige et une lame mince de cuivre *c* soudée dans le prolongement de l'axe de cette tige. Le ressaut *f* protège les feuilles d'un contact trop intime avec la lame qui, elle-même plus longue et plus large que les feuilles, empêche celles-ci de se coller l'une à l'autre.

D'autre part, deux plateaux de cuivre F F portés par des tiges de cuivre K K glissant dans deux douilles *g g* soudées aux



extrémités du diamètre horizontal et aux parois de la boîte, peuvent être amenés en contact des méplats *f*, *m* ; en sorte que, pendant le transport, les feuilles sont renfermées entre ces plateaux et la lame de cuivre et ne risquent pas de se froisser ni de se déformer.

Pour l'observation, les plateaux sont retirés contre les parois internes de la boîte comme l'indique la figure. C'est à cette position des plateaux que correspond la graduation de l'instrument qui doit alors être tenu verticalement.

La détermination de la divergence se fait au moyen d'une échelle millimétrique placée sur la lame de glace antérieure. A égale hauteur, on a collé sur la plaque de verre postérieure une feuille de papier pour donner le plan de la visée. On tient l'instrument à la main ; on vise avec un œil sur les deux bords

supérieurs des bandes de papier et on lit en même temps le nombre de millimètres qui correspond à la divergence. L'œil doit être éloigné de l'électroscope à la distance de la vue distincte : dans ces conditions, l'influence de la parallaxe est faible.

La graduation de l'instrument se fait très aisément dans un laboratoire avec une pile.

26. Tel que le livre la maison Schorss de Vienne, l'électromètre d'Exner fonctionne très bien entre 50 et 200 volts, mais pour des déviations inférieures à 50 ou supérieures à 200, les déviations ne sont plus sûres. Pour 50 volts, l'écart des feuilles est à peine de 5 millimètres, le zéro correspond déjà à un écart d'environ 3 millimètres. De plus, celui-ci n'est pas absolument constant, car les feuilles se déforment un peu et ne retombent pas toujours de la même façon quand on les décharge, après qu'elles sont restées déviées quelque temps sous une charge un peu forte. Au-dessus de 250 volts, soit environ 25 millimètres, les feuilles ne coupent plus l'échelle dans le plan formé par les bords supérieurs des deux bandes de papier et les lectures ne sont plus possibles. Elles ne tardent d'ailleurs pas à se décharger contre les plateaux où elles restent souvent collées par leur extrémité[1].

27. *Palmieri*, qui a le plus préconisé l'étude de l'électricité atmosphérique par des observations normales faites dans des conditions de lieu et de temps bien déterminées, n'a pas, à proprement parler, créé de matériel pratiquement transportable. L'appareil portatif qu'il a imaginé, outre qu'il présente l'inconvénient, comme l'appareil fixe, de ne pas permettre de suivre les variations rapides du potentiel, constitue un bagage très encombrant : l'instrument de mesure étant son électromètre bien connu ou l'électroscope de Bohnenberger[2].

[1] J'indiquerai dans la description de mes expériences, les modifications que j'ai fait subir à cet électromètre.

[2] L. Palmieri, *Lois et Origine de l'électricité atmosphérique*, p. 12 et 25, Paris, 1885.

CHAPITRE II

MÉTHODES

Classe I.

28. Dans cette classe, je range les différents procédés par lesquels on peut établir sur un conducteur fixe le potentiel qui existe en certains points de la masse d'air qui l'environne.

Pour établir sur un conducteur isolé le potentiel qui existe à chaque instant en un certain point du champ électrique de l'atmosphère, il faut favoriser les déperditions de telle façon que la densité sur le conducteur soit constamment nulle au point considéré.

29. Ce résultat serait rigoureusement obtenu au moyen d'une pointe conductrice infiniment aiguë, mais dans la pratique il n'est obtenu qu'avec une approximation plus ou moins grande par l'emploi :

1° De conducteurs allongés ;

2° De pointes métalliques ou de tiges de certains métaux ;

3° De flammes ou de mèches ;

4° D'écoulements d'eau ou de substances conductrices pulvérulentes.

Dans tous les cas, le potentiel obtenu est simplement proportionnel au potentiel des couches d'air voisines de l'extrémité supérieure du conducteur. Quel que soit d'ailleurs le mode de dispersion actif ; que ce soit le contact des molécules d'air comme dans les deux premiers cas, ou les courants de gaz chauds comme dans le troisième, ou encore les gouttelettes ou particules conductrices comme dans le quatrième, il faut

[illegible] un certain temps pour un un point déterminé du conducteur soit ramené à l'état neutre.

C'est ainsi que si un pays d'orages venait compter un grand nombre de fois l'électricité du conducteur après avoir été ramené chaque fois à l'état neutre, il est qu'au bout d'un certain temps que le pays d'orages aurait enlevé au point touché toute électricité appréciable.

D'après cela, la quantité d'un conducteur dépend de la quantité limite d'électricité appréciable qu'il ne peut enlever au conducteur et du temps qu'il emploie pour atteindre cette limite. Chaque *collecteur* a, de ce fait, un rendement qui peut être établi en le faisant fonctionner dans un cylindre de Faraday chargé à un potentiel déterminé.

J'examinerai les divers dispositifs collecteurs employés en en faisant ressortir les avantages et les inconvénients.

I. — *Conducteurs allongés.*

30. *Lemonnier*, l'*abbé Mazéas*, le *Père Cotte* en France et le *Père Beccaria* en Italie, se servaient pour recueillir l'électricité naturelle, de longs fils de fer tendus dans l'air, au moyen de cordons de soie isolants, entre les parties élevées de bâtiments ou d'éminences naturelles quelconques.

Dans l'opinion de ces physiciens, la charge du fil était due au contact direct des particules d'air électrisé : elle était par conséquent proportionnelle à l'intensité d'électrisation de l'air. Lemonnier[1] trouva ainsi une certaine variation diurne de l'électricité de l'air ; mais il eut des doutes sur la réalité de cette variation en considérant qu'elle correspondait aux changements d'humidité qui faisaient varier l'isolement des cordons de soie. L'abbé Mazéas reconnut aussi l'influence de l'humidité sur le fonctionnement de l'appareil : « Il semblerait, dit-il[2],

[1] Lemonnier, *Histoire de l'Académie des Sciences* pr 1752, p. 241.
[2] L'abbé Mazéas, *Phil. Trans. abridged*, p. 434, 1753.

que l'électricité est toujours de même intensité par temps d'égale sécheresse. » Beccaria éprouva les mêmes difficultés et ne réussit à révéler une variation diurne certaine que dans les jours beaux et secs de l'été. Il remarqua en outre, de même que l'abbé Mazéas, que son « fil explorateur » après avoir été touché, se chargeait avec une rapidité variable : mettant parfois plus d'une minute et d'autres fois une seconde seulement pour atteindre le degré d'électrisation préalable. Il désignait du nom de *frequenza* (fréquence) la qualité atmosphérique dont dépendait la rapidité de la charge.

31. *Sir W. Thomson*[1] a observé, par ce procédé, les variations électriques par temps troublé. Il se servait d'un conducteur-cylindrique de 10 pouces de long et de 4 pouces de diamètre, isolé au-dessus du toit de son observatoire électrique de l'île d'Arran, et communiquant avec l'électromètre par un fil fin. Il remarqua qu'il suffisait de quelques secondes et parfois même d'une fraction de seconde pour que l'électromètre atteignît sa déviation, pendant les coups de vent et les averses de pluie.

Sir W. Thomson montra que, conformément à la théorie de l'influence, la charge plus ou moins rapide acquise par un conducteur isolé dans l'air était due, en réalité, aux déperditions plus ou moins rapides, par le contact des particules conductrices de l'atmosphère, de la charge développée par influence sur le conducteur.

Ces déperditions, ayant lieu arbitrairement sur toute la surface du conducteur, font varier la position de la ligne neutre qui dépend elle-même de la loi de distribution des masses influentes. Par suite, le potentiel du conducteur, qui est celui de la couche de niveau atmosphérique passant par la ligne neutre, ne reste pas, à chaque instant, égal ou proportionnel à celui d'une région déterminée de l'atmosphère.

32. Ainsi, ce procédé ne satisfait que de très loin aux condi-

[1] W. Thomson, *Reprints of papers*, § 294, p. 226.

tions imposées pour la mesure des variations du potentiel en un point de l'air, car la déperdition qui devrait être accrue et régularisée en un point du conducteur, se fait, dans ce cas, sur toute sa surface et d'une façon variable avec l'état de cette surface et l'état de l'atmosphère.

J'ai pu me rendre compte de ces inconvénients en étudiant le fonctionnement, comme collecteurs, de longs tubes de caoutchouc munis à leur extrémité inférieure d'un ajutage fin par lequel s'écoulait l'eau d'un réservoir élevé.

Un de ces tubes (de 20 mètres de longueur, de 12 millimètres de diamètre extérieur et de 7 millimètres de diamètre intérieur) était tendu entre un réservoir isolé sur le toit du pavillon météorologique de l'observatoire et un bâton d'ébonite verni qui isolait son extrémité inférieure à environ 2 mètres du sol: de telle sorte que les deux extrémités du tube étaient à une distance verticale de 8 mètres environ. Le réservoir était mis en communication par un fil fin, avec l'électromètre Mascart installé à l'intérieur du pavillon.

Le 6 mai 1893, à 9 heures du matin, l'écoulement ayant été établi, l'électromètre marqua rapidement un potentiel d'environ 100 volts; mais l'ajutage s'étant obstrué et ne donnant plus issue qu'à quelques gouttes à de rares intervalles, le potentiel ne s'en maintint pas moins vers 100 et s'éleva même vers 150. En même temps, des oscillations rapides se manifestèrent dans les indications de l'électromètre et augmentèrent d'amplitude jusqu'à atteindre de 50 à 100 volts. On obtint même des signes négatifs entre deux et quatre heures du soir avec des variations assez rapides de — 40 à + 70 volts.

L'ajutage étant débouché et l'écoulement rétabli par intervalles, l'allure de la courbe ne se modifia pas sensiblement. Cependant, on put remarquer que l'amplitude des oscillations était corrélative de la force du vent qui soufflait du nord avec une vitesse maxima de 8 à 9 mètres entre deux et quatre heures du soir.

Les variations de potentiel ainsi obtenues étaient donc indé-

pendantes des variations du *champ* électrique de l'atmosphère. Et cela s'explique ainsi: d'abord, la surface très humide du caoutchouc faisait du tube un corps assez conducteur, tendant par le fait de l'écoulement d'eau à se mettre au potentiel de l'air à l'extrémité inférieure. Le tube était par suite chargé d'électricité négative dont la dispersion, surtout vers l'extrémité supérieure, était grandement favorisée par les villosités de la surface du tube en caoutchouc entoilé. Il en résultait évidemment un état d'équilibre électrique très variable. Une condensation de la charge négative était d'ailleurs possible par l'intermédiaire du caoutchouc; il y a même lieu de présumer que c'est à un apport par contact de masses négatives de l'atmosphère, qu'on doit attribuer les signes négatifs qui se sont manifestés.

Quoi qu'il en soit, le fonctionnement de cet appareil ne pouvait être régularisé qu'en augmentant le débit de l'ajutage et en diminuant les causes de perte ou de charge à la surface, ce à quoi l'on parvint en développant les 20 mètres de hauteur du tube pour augmenter la pression d'eau et en vernissant soigneusement à la gomme laque la surface séchée de ce tube.

33. On voit donc que le procédé des longs conducteurs aériens peut servir à révéler l'électricité atmosphérique, mais non à la mesurer.

II. — *a) Pointes métalliques.*

34. Le paratonnerre de Franklin et les grandes barres pointues en usage dans les premières années de la découverte de l'électricité atmosphérique présentent à peu près les mêmes inconvénients que le procédé de Beccaria, car les pointes de ces appareils étaient généralement trop grossières eu égard surtout à la capacité considérable des conducteurs.

L'appareil au moyen duquel Lemonnier[1] découvrit de l'élec-

[1] Lemonnier, *loc. cit.*, p. 233-43.

tricité naturelle par ciel serein constituait déjà un perfectionnement parce que, tout en étant très élevé, il était de faible capacité et facilement isolable. Cet appareil consistait en une perche de 32 pieds de hauteur, à l'extrémité de laquelle était fixé un gros tube de verre très fort qui portait un tuyau de fer-blanc terminé en pointe ; vers le milieu de ce tuyau était lié un fil de fer fort mince, long d'environ 50 toises qui, sans toucher à aucun corps, venait se rendre à un cordon de soie tendu horizontalement dans un pavillon.

Les difficultés d'isolement ne tardèrent d'ailleurs pas à faire réduire les dimensions des appareils. Les autres causes d'erreur diminuant aussi, jusqu'à un certain point, avec les dimensions du conducteur exposé et en proportion de la finesse de la pointe, on obtint de meilleurs résultats au moyen d'aiguilles ou de houppes d'aiguilles fines isolées à l'extrémité d'une perche non conductrice et reliées par un fil très fin à l'électroscope. C'est ainsi que commencèrent à observer Cavallo, de Saussure et Volta.

Peltier[1] a également employé ce procédé pour étudier l'électricité des nuages. Il trouva une cause d'erreur dans l'action chimique que les vapeurs et l'humidité exercent sur les fils des métaux oxydables exposés à l'air. Cette cause d'erreur lui parut d'autant plus importante qu'il faisait usage d'un galvanomètre ou multiplicateur de 3000 tours, intercalé dans le circuit entre la pointe et la terre où plongeait le fil.

Son appareil était formé d'un fil de cuivre entouré de soie et recouvert de plusieurs couches de vernis gras ; le haut était terminé par une houppe de fils de platine à 28 mètres au-dessus du sol et le bout inférieur était terminé également par un fil de platine plongeant de 13 mètres dans un puits.

La force électromotrice développée par l'oxydation du métal ne s'élevant pas à plus de 1 ou 2 volts ne peut troubler les indications d'un électromètre ; cette oxydation nuit en réalité,

[1] Peltier, *C. R*, 2e semestre, 1836, t. III, p. 145.

en émoussant les pointes et diminuant par suite la convection. L'emploi du platine n'en reste pas moins indiqué toutes les fois qu'on veut appliquer ce procédé.

35. Mais quelque soin qu'on apporte à leur confection, les pointes ne constituent qu'un très imparfait égaliseur de potentiel ou collecteur. Une pointe ne peut jamais être assez aiguë physiquement pour que la densité y devienne et s'y conserve nulle ; elle s'altère d'ailleurs toujours à l'air et la charge qu'elle garde, et qui correspond au *potentiel de départ*, dont parle M. E. Bichat[1], fait varier le coefficient de proportionnalité des indications qu'elle fournit.

La commodité de l'emploi des pointes m'avait cependant fait songer à les utiliser pour l'exploration électrique des hautes régions de l'atmosphère. J'essayai, dans ce but, de comparer leur rendement à celui du collecteur à eau de l'électromètre de l'observatoire. Dans les mêmes conditions d'exposition, c'est-à-dire à l'extrémité du tube d'écoulement, des houppes de pointes de platine ou d'argent ne donnèrent rien ou presque rien dans aucun cas de ciel clair ou couvert. A 2 mètres au-dessus du sol, au milieu d'un champ libre et au bouton d'un électromètre d'Exner, je n'obtins une déviation qu'au passage de grandes nuées orageuses, qui donnèrent même des décharges fréquentes des feuilles, soit plus de 250 volts.

J'ai remarqué que les pointes fonctionnent surtout sous l'influence de variations brusques et que la convection qui ne s'établit pas pour un potentiel déterminé, subsiste pour ce potentiel, si elle a été établie auparavant sous l'influence d'un potentiel plus élevé.

36. Il résulte de là que, même pour la mesure des potentiels d'un point élevé de l'atmosphère, l'emploi des pointes ne permet pas d'obtenir des résultats bien définis, attendu que, sur la longueur des conducteurs nécessaires pour la liaison au sol, il peut se produire des pertes relativement importantes.

[1] E. Bichat, Sur le tourniquet électrique et la déperdition de l'électricité par convection (*Journal de Physique*, 2e série, t. VII, p. 385, 1888).

b) Tiges d'aluminium.

37. Aux procédés que nous venons d'examiner, se rattache l'emploi de tiges d'aluminium qui a été proposé par M. Elster et essayé par le Dr Bornstein[1] pour ses mesures électriques en ballon, au mois d'août 1893.

38. Ce procédé de collection se rapporte à la déperdition d'électricité négative que subit un conducteur chargé, sous l'influence des radiations solaires. Il résulte de ce phénomène, étudié par MM. Elster et Geitel[2] en Allemagne, qu'un conducteur isolé et exposé à l'influence du champ terrestre en plein air et au soleil, acquiert un potentiel positif proportionnel à celui des couches d'air avoisinantes. Mais la déperdition est loin d'être également active pour tous les métaux. M. Elster avait adopté l'aluminium qui présente une sensibilité particulière à l'action même de la lumière diffuse.

39. M. Bornstein éprouva, dès ses premiers essais, une difficulté qui provient de ce que la déperdition se modifie, toutes choses restant égales d'ailleurs, avec l'état de la surface du métal. Il résulte en effet des nombreuses expériences de M. E. Branly[3] que la déperdition, en rapport avec l'intensité de la lumière, « décroît à mesure qu'on s'éloigne du moment où le poli a été effectué ». Pour tout métal poli, la déperdition négative, d'abord considérablement plus grande que la positive, devient, après quelques jours, sensiblement égale pour les deux électricités, très lente et indépendante de la lumière.

40. La simple exposition à l'air de tiges d'aluminium ou même de bismuth — métal qui subit une déperdition notable dans l'obscurité — ne peut donc point constituer un mode de

[1] Bornstein, *Verhandlungen der physik. Gesellschaft zu Berlin*, Jahrg. 13, p. 39, mars 1894.

[2] Elster et Geitel, *Annalen der Physik und Chemie*, t. XXXVIII, p. 497, 1889.

[3] Ed. Branly, *C. R.*, 1er semestre, 1893, t. CXVI, p. 741-44.

collection continu pour les observations d'électricité atmosphérique.

III. — *Flammes et mèches.*

41. Volta[1] eut l'idée, en 1787, de terminer la tige de Franklin par une petite bougie ou un fil soufré que l'on allumait au moment de l'expérience. Il reconnut que la flamme ne produisait pas par elle-même d'électricité sensible et qu'elle augmentait cependant considérablement la charge de l'électromètre atmosphérique. Il trouva en outre que la grandeur de la flamme était à peu près indifférente, que deux mèches ne donnaient pas plus d'électricité qu'une seule, et qu'on pouvait aussi se servir de corps donnant de la fumée sans flamme, quoique l'effet fût alors moins marqué. Pour ces observations d'électricité atmosphérique, Volta fixait à la pointe d'une tige métallique des mèches d'amadou ou de coton soufré. Pendant les fortes pluies, il remplaçait les mèches par une petite lanterne ouverte contenant une lampe à esprit de vin.

Schübler employa le procédé de Volta et se servit préférablement de mèches soufrées.

Sir W. Thomson, qui remit en faveur la méthode de Volta longtemps abandonnée, se servit, pour les électromètres portatifs, de baguettes de papier filtre roulé, imprégné de nitrate de plomb.

42. L'usage de ces mèches exige d'assez grandes précautions. Ainsi, M. Pellat[2] a trouvé que la combustion d'une mèche charge l'électromètre à un potentiel pouvant différer notablement (8 à 10 volts) de celui de l'air et que cette différence de potentiel est très variable pendant la durée d'une même combustion. « En particulier, quand la partie incandescente

[1] Voy. Mascart, *Traité d'Electricité statique*, t. II, p. 568, 1876.

[2] Pellat, *C. R.*, 1885, t. C, p. 735, et *Journ. de Physique*, 2e série, t. IV, p. 254.

descend au-dessous de la tige de laiton qui supporte la mèche, et forme une couronne incandescente autour de cette tige, le potentiel de l'électromètre peut être supérieur de plus de 100 volts à celui de l'air où se fait la combustion. »

43. Mais cette dernière difficulté, que j'ai souvent éprouvée, peut toujours être évitée, et à cette condition, les écarts signalés par M. Pellat ne seraient pas assez importants pour faire rejeter l'emploi de ce mode de collection pour les mesures d'électricité atmosphérique.

Les plus grandes différences de potentiel qui peuvent se produire pendant la combustion d'une mèche proviennent de l'action variable et inévitable du vent dans le cas des mesures en un point fixe de l'atmosphère.

Ces différences sont cependant d'autant plus faibles que la combustion normale, dans l'air calme, est plus rapide et que la gazéification de la substance même de la mèche est plus parfaite.

Cette dernière condition est nécessaire dans tous les cas. Elle peut être obtenue en employant un papier de cellulose pure, brûlant sans aucun résidu.

Quoi qu'il en soit, l'usage des mèches reste limité aux appareils portatifs et ne convient pas à l'étude des variations rapides et continues du potentiel en un point *fixe*[1].

Cette étude ne peut être poursuivie que par l'emploi de collecteurs à très grand débit.

44. Les *flammes* constituent des collecteurs de cette nature. Ainsi, d'après les expériences de M. Pellat[2], « une flamme courte (0^m01 environ) de gaz d'éclairage brûlant à l'extrémité d'un bec métallique est le meilleur moyen de prendre le potentiel d'une masse d'air ; la force électro-motrice de combustion très faible, s'éliminant dans les différences ». Un tel

[1] L'opinion que j'émets ici est fondée sur des expériences personnelles que je décrirai plus loin, en même temps que les recherches qui y ont donné lieu. Cette opinion concerne l'emploi ordinaire, *sur le sol*, de ce genre de collecteur.

[2] Pellat, *Journal de Physique*, 2e série, t. IV, p 255 et suiv., 1885.

appareil relié à un électromètre amenait presque instantanément l'aiguille au potentiel de l'air, c'est-à-dire que les variations du potentiel de l'air étaient accusées entièrement par l'aiguille dans le temps que celle-ci met à passer d'une position d'équilibre à l'autre.

Une flamme isolée quelconque, dans laquelle plonge l'extrémité du fil collecteur, agit de même : des conducteurs de plus de 10 mètres de longueur sont ainsi amenés presque instantanément au potentiel même de l'air environnant la flamme.

45. *M. Fr. Exner*[1] s'est servi presque exclusivement de flammes pour ses mesures normales de l'intensité du champ.

Dans son dispositif un fil de platine, fixé à un petit chandelier de laiton, a une extrémité libre qui plonge dans la flamme de la bougie, tandis que l'autre extrémité, terminée par un crochet, peut être reliée par un fil à l'électroscope. Le chandelier est fixé sur une tige d'ébonite qui est élevée à la hauteur convenable au-dessus du sol, au moyen d'une sorte de canne à pêche dont le premier tronçon peut être fiché en terre ; l'électroscope est tenu à la main.

46. *MM. Elster* et *Geitel*[2] qui ont étudié l'électricité atmosphérique dans leur propriété de Wolfenbüttel, en suivant les indications et se servant des instruments de M. Exner, ont fait une longue série d'observations — par beau temps principalement — au moyen d'un collecteur à flamme installé à une fenêtre de leur maison. Ce collecteur consistait en une petite lampe métallique à pétrole, portée par un bâton d'ébonite protégé par un tube de verre.

47. A côté des avantages pour ainsi dire théoriques qu'offrent en général les flammes employées comme collecteurs, celles de bougie, d'huile ou d'essence présentent, dans la pratique, quelques inconvénients dont le principal est évidemment l'ex-

[1] Fr. Exner, Ueber transportable Apparate.... *(loc. cit.*, p. 1096).

[2] Elster et Geitel, *Sitzungsberichte der Akad.*, Wien, t. CI., p. 750, 1892.

tinction par le vent et la pluie, ce qui en limite presque forcément l'usage aux jours relativement beaux et calmes[1].

48. Pour une installation fixe, l'usage du gaz permet de donner à la flamme, par la pression, une assez grande résistance à l'action du vent. Cependant il faut encore pour cela des conditions particulières qui ont été heureusement réalisées dans un dispositif imaginé par le Serg. Park Morrill de *John's Kopkins University*, Md. (E.-U.).

Ce dispositif élaboré sous la direction du professeur Rowland a été mis en fonction lors de l'étude entreprise, de 1885 à 1888, aux Etats-Unis, par le *Chief Signal Officer*, dans le but de rechercher si les observations d'électricité atmosphérique pouvaient être utilisées pour la prévision du temps.

Le rapporteur de cette étude, M. Mendenhall, alors chef du laboratoire de physique de l'office de Washington, assure que l'appareil du Serg. Morrill donna des résultats très satisfaisants pendant la courte période de son emploi.

49. J'emprunte à ce rapport[2] la description suivante :

« En principe, pour que le vent soit sans action sur une flamme, il faut qu'il exerce une pression égale sur l'air qui sert à l'alimentation et sur les gaz dégagés. On a réalisé cette condition en entourant la cheminée (métallique) de la lampe d'une seconde cheminée qui force l'air d'alimentation à descendre entre ces deux parois, et en surmontant le tout d'un cône ouvert. On a fait arriver le gaz par l'étroite colonne d'un grand isolateur Mascart servant de support à la lampe.

La figure 1 (pl. I) montre le collecteur complet. L'isolateur supportant l'appareil, repose sur un réservoir imperméable en caoutchouc et y est solidement fixé par des bandes métalliques. Le tube, que l'on voit sur une des faces, conduit le gaz à la base de l'isolateur.

[1] Je viens de réaliser un collecteur éminemment pratique en faisant usage de petites lampes à acétylène.

[2] T. C. Mendenhall, Report of studies of atmospheric Electricity *(Memoirs of the National Academy of Sciences*, vol. V, p. 113-318, 1891).

Fig. 1.

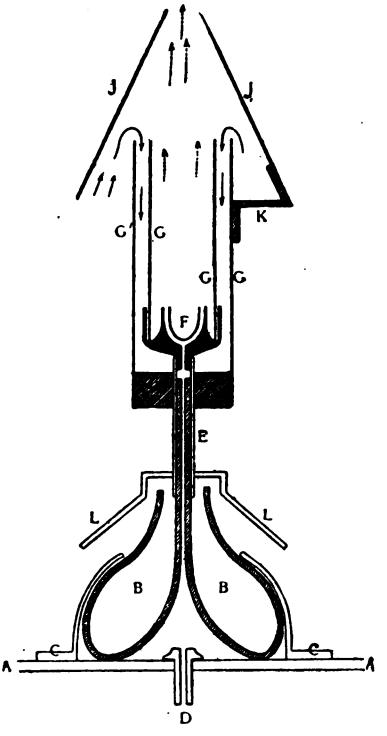


Fig. 2.

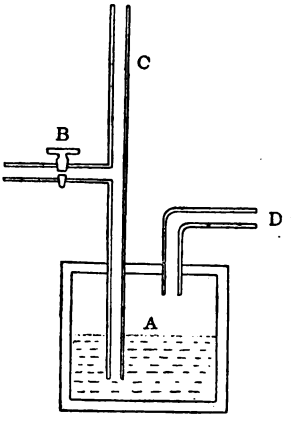


Fig. 3.

PLANCHE I. — Collecteur à flamme du Sergent Park Morrill.

La figure 2 est une coupe du même appareil. A est la paroi à laquelle l'isolateur B est attaché par un collier et des brides C. Le gaz arrive par le tuyau D au brûleur d'Argand F, en passant par l'étroite colonne E. G et G_1 sont respectivement les cheminées intérieure et extérieure. H est un fort collier supportant la cheminée extérieure G_1. Le cône J est porté par trois tasseaux K. L est un parapluie pour protéger l'isolateur. Les flèches indiquent la circulation de l'air d'alimentation et des gaz de la combustion.

Ce collecteur présentait encore quelques irrégularités dues aux variations de pression du gaz fourni. On y a remédié par l'addition d'un régulateur représenté en coupe dans la figure 3. Le gaz entre par le robinet B et passe au collecteur par le tuyau C. On choisit d'abord un bec brûlant suffisamment au-dessous d'une certaine pression. On introduit de l'eau dans le réservoir A, à une hauteur telle que son niveau au-dessus de l'extrémité inférieure de C donne cette pression. S'il arrive que la pression fournie soit inférieure à celle qui est nécessaire à la combustion, on ouvre un peu le robinet B ; de telle sorte qu'au moment où cette pression est atteinte le gaz refoule l'eau juste à l'extrémité du tuyau C. Quand la pression augmente, le gaz sort du tuyau C et de là s'échappe dans l'air par le tuyau D, tandis que la pression au collecteur reste la même.

La forme symétrique de ce collecteur permettait de réaliser des expositions comparables dans toutes les stations du réseau où des observations simultanées devaient être recueillies. Il suffisait en effet de placer tous ces collecteurs identiques au centre de disques métalliques de même rayon ; ce rayon étant très grand relativement à la hauteur du brûleur au-dessus du disque.

IV. — *Ecoulements d'eau.*

50. La première idée d'utiliser l'écoulement d'eau ou d'une poussière conductrice, comme collecteur pour l'observation de l'électricité atmosphérique appartient à *Palmieri* et repose sur les phénomènes présentés par les veines liquides ascendantes et descendantes[1]. L'écoulement de paillettes de plomb, de poussières métalliques, de sable ou de cendres du Vésuve donnait les mêmes résultats.

Mais l'explication de ces phénomènes et la justification de leur emploi comme méthode d'observation électrique sont dues à Sir *W. Thomson*[2], qui réalisa et indiqua le premier, en 1859, un dispositif pratique au moyen duquel il observa les variations du potentiel électrique de l'atmosphère.

Il disposa le réservoir d'eau *à l'intérieur* du laboratoire ; le tube d'écoulement passant par une petite ouverture pratiquée dans le mur et laissant échapper le jet d'eau par un ajutage très fin à 2 ou 3 pieds au dehors. De cette façon l'isolement du réservoir était obtenu facilement par tous les temps en desséchant les supports de verre au moyen de ponce sulfurique.

Ce dispositif fut d'abord établi à l'Observatoire de Kew en 1861 et fut, par la suite, adopté dans presque tous les observatoires tant publics que privés, en même temps que les électromètres de torsion du système Thomson.

51. Palmieri fut à peu près le seul à s'opposer à l'adoption de cette méthode ; il continua à se servir de son appareil à conducteur mobile dont je parlerai plus loin. « Voici, dit *Palmieri*[3], pour quelles raisons je ne me suis pas servi de la veine liquide descendante pour avoir les valeurs de l'électricité dominant dans l'atmosphère : 1° Il faut, avant tout, que la

[1] L. Palmieri, *Lois et Origine de l'Electricité atmosphérique*, p. 6.
[2] W. Thomson, *Reprints of papers*, § 262, p. 200 et passim.
[3] Palmieri, *loc. cit.*, p. 9.

vitesse d'écoulement soit constante; 2° il est difficile d'obtenir un bon isolement du vase avec l'humidité, la pluie ou la neige; 3° avec le vent, le jet liquide s'agite, ce qui trouble l'expérience; 4° enfin, par les froids vifs l'eau se congèle et les observations ne peuvent continuer, à moins que l'on ne veuille employer de l'alcool, ce qui ne serait pas économique. »

52. Afin de pouvoir apprécier le bien fondé de ces objections et avant de décrire les dispositifs pratiques par lesquels on s'est efforcé de les résoudre, je rappellerai le mécanisme théorique de l'écoulement fonctionnant comme égaliseur de potentiel.

Dans les collecteurs à écoulement d'eau, ce sont les gouttelettes échappées de l'extrémité de la veine liquide qui font l'effet des contacts répétés d'un plan d'épreuve. Elles représentent des portions d'un point de la surface même du conducteur, qui se détacheraient en emportant la charge induite développée en ce point jusqu'à à amener celui-ci à l'état neutre. Le conducteur est ainsi porté, par un mécanisme bien défini, à un potentiel égal à celui de la surface de niveau qui passe par le point où la veine liquide se résout en gouttelettes séparées.

En réalité, l'égalité des potentiels n'est généralement pas obtenue, car le *débit* de ce genre de collecteur n'est jamais assez rapide pour que la *perte*, dépendant de l'isolement des diverses parties de l'appareil, soit relativement nulle ou insensible. Il s'ensuit que de brusques variations dans le potentiel de l'air, suivies d'un brusque retour au premier état, doivent passer inaperçues et, comme l'a fait remarquer M. Pellat[1], les maxima et les minima doivent être diminués. C'est pour cette raison que M. Fr. Exner a préféré employer des flammes au lieu d'écoulements d'eau, pour ses mesures normales.

53. Mais on doit remarquer que les erreurs provenant de ce fait ne sont importantes qu'avec un débit faible, comme celui

[1] Pellat, *Journal de Physique*, 2e série, t. IV, p. 260, 1885.

des expériences de M. Pellat, et avec un isolement médiocre comme celui qui peut être obtenu dans l'installation transportable de M. Exner.

Ainsi, dans son installation expérimentale, M. Pellat[1] a trouvé qu'avec un débit de 8 litres d'eau en 12 heures, il fallait 6 minutes pour que l'électromètre accusât les 8/10 de la variation de potentiel produite par 100 volts ; avec un débit de 12 litres en 12 heures, il fallait 5 minutes pour que l'aiguille accusât la presque totalité de la variation de potentiel. Et, d'autre part, M. Fr. Exner[2], employant pour ses connexions des conducteurs de 10 mètres de longueur en plein air, a trouvé qu'un collecteur débitant 25 centimètres cubes d'eau par minute (36 litres par jour) donnait une valeur trop faible de 6 pour 100.

Ce résultat est d'ailleurs généralement obtenu au bout d'une minute ou une minute et demie avec un débit de 6 litres par heure, dans les installations fixes des observatoires.

C'est dans ces conditions moyennes que l'enregistreur Mascart fonctionne depuis 1885 à l'Observatoire de Lyon. Jusqu'en 1896, le collecteur était porté par trois isolateurs Mascart et le fil directement lié à l'électromètre. L'isolement total était tel que la perte en une minute était en moyenne 1/15 d'une charge moyenne (100 volts).

54. Le rendement peut, du reste, être augmenté :

1° *Par le débit*, en utilisant mieux la dépense d'eau pour le débit électrique. M. Pellat a fait, en effet, remarquer que la grosseur des gouttes a une influence marquée sur la rapidité de l'égalisation de potentiel : « pour une même dépense d'eau il y a avantage à employer des gouttes fines, car la masse de la goutte varie comme le cube de son rayon et sa capacité électrique comme la première puissance du rayon. » Il a conseillé, en conséquence, de multiplier les orifices d'écoulement (en

[1] Pellat, *loc cit.*

[2] Exner, *Sitzungsberichte*, Wien, t. XCV, p. 1095; 1887.

les disposant, par exemple, sur le pourtour d'une couronne) en réduisant convenablement les orifices pour ne pas augmenter la dépense d'eau.

Je ne sache pas qu'un tel dispositif ait été adopté dans aucun observatoire.

55. 2° *Par l'isolement.* Les isolateurs Mascart, qui sont généralement employés dans les installations fixes, ne valent que par la qualité du verre qui les constituent et par la qualité et la concentration de l'acide sulfurique employé à son dessèchement. Leur bon fonctionnement ne peut d'ailleurs être assuré que par les soins extrêmes de propreté que nécessitent tous les appareils hétérostatiques de Thomson[1].

56. La paraffine donne un isolement au moins équivalent à celui que donnent les meilleurs supports à acide sulfurique, mais sous cette condition absolue que la surface de la paraffine reste nette de toute poussière. M. A.-B. Chauveau[2] a pu réaliser un excellent isolement de son réservoir d'eau, au sommet de la tour Eiffel, au moyen de trois tubes de verre scellés dans une couche de soufre et noyés dans une masse épaisse de paraffine; mais cela grâce à ce que, à la hauteur de 300 mètres, l'air contient moins de poussière que dans le voisinage des habitations.

57. Nous nous sommes rendu compte à l'Observatoire de Lyon que ce mode d'isolement ne peut être employé pour des observations continues au voisinage du sol.

Nous réalisons actuellement une amélioration considérable de l'isolement en faisant reposer le réservoir sur trois cylindres de soufre compact à surface polie[3].

[1] Lire à ce sujet les conseils pratiques de Lord Kelvin (Sir W. Thomson), dans : *Conférences scientifiques et Allocutions*, traduites par P. Lugol, Paris, Gauthier-Villars, ch. XI, Mesures électriques, p. 293, 1893.

[2] A.-B. Chauveau, *C. R.*, t. CXVII, p. 1069, 1893.

[3] Le soufre est connu depuis longtemps comme un excellent isolant et M. Ed. Branly a été conduit à l'adopter exclusivement pour la construction de ses électroscopes dans ses délicates recherches sur la déperdition (*C. R.*, t. CXIV, p. 68, 1892). Mais il est généralement trop cassant pour être

Ainsi, depuis deux ans que M. le Directeur de l'Observatoire de Lyon a fait substituer aux isolateurs Mascart des cylindres de soufre convenablement protégés contre les chutes directes de poussières, l'isolement total de l'électromètre s'est maintenu tel que la perte en une minute n'est jamais supérieure à 1/30 d'une charge moyenne de 100 volts.

58. Dans ces conditions, le rendement du collecteur à écoulement d'eau est suffisant pour l'étude des variations en un point. Mais il faut toutefois que ce rendement soit constant et régulier et que l'exposition soit constante, c'est-à-dire que le point de l'air où s'établit l'égalisation de potentiel ait une position invariable par rapport à la surface de la terre et aux objets qui en font partie.

59. Le débit peut être rendu constant en employant, comme l'a conseillé M. Pellat, un vase de Mariotte, ou simplement en disposant l'orifice d'écoulement notablement au-dessous du fond du réservoir d'eau, pour que la diminution de la hauteur du liquide dans le vase (qu'on peut d'ailleurs prendre à grande surface par rapport à sa hauteur) ne donne lieu qu'à une diminution de pression négligeable. En multipliant les orifices d'écoulement très fins, on pallierait en outre à un défaut que présente l'ajutage à trou unique et qui est le suivant : pour un grand débit, un orifice donne issue à une veine liquide assez longue qui s'infléchit sous l'action du vent et peut diminuer

employé à porter une charge importante comme un réservoir d'eau de 50 à 70 kilogrammes; et d'autre part, sa surface fondue présente des aspérités qui retiennent facilement la poussière Ces inconvénients sont évités et, partant, l'usage du soufre est considérablement facilité par le moyen suivant que je dois à l'obligeance de M. Gouy : On fait fondre du soufre en canons jusqu'à l'amener à l'état parfaitement fluide. On laisse refroidir en agitant constamment avec une baguette de verre jusqu'à ce que la masse prenne la consistance d'une crème. On coule alors dans des moules, de carton par exemple. On obtient ainsi une masse plus homogène et à grain cristallin bien plus fin que le canon de soufre. Aussitôt que la masse est refroidie, elle peut être travaillée au tour et à la lime. On obtient ainsi des cylindres ou des disques présentant une surface parfaitement polie et offrant une résistance très grande à l'écrasement.

sous diverses influences, en sorte que le point de rupture de la veine, qui représente le point d'équilibre de potentiel, peut être déplacé d'une quantité notable dans le champ électrique que l'on mesure. Il en résulte un écart accidentel dont on peut d'ailleurs dans chaque cas apprécier l'importance.

Ainsi, à l'Observatoire de Lyon, le tube d'écoulement est à $3^{m}50$ au-dessus du sol et se termine à $1^{m}20$ du mur du pavillon où est installé le collecteur. La veine liquide du débit normal a environ 10 centimètres : ce qui porte le point d'équilibre à $1^{m}30$ du mur.

Si nous supposons un déplacement de 10 centimètres par les plus forts vents de S. ou de N., on aura un écart de 7 o/o qui, d'ailleurs, n'imprimera sa trace que si le déplacement se maintient continuement pendant plus de dix secondes. L'écart est à peu près le même pour les déplacements verticaux de 15 à 25 centimètres que subit l'extrémité du tube sous l'action des rafales ; et, dans ce cas, on a des oscillations rapides qui se manifestent surtout par suite de la décharge par contact du tube contre les parois de l'ouverture du mur.

Ces écarts accidentels, faibles en somme, se traduisent à l'enregistrement par des hachures ou des zigzags particuliers à chaque cas et à travers lesquels la courbe moyenne de variation peut facilement être figurée.

Par temps ordinaire, les écarts accidentels provenant de ce fait peuvent atteindre de 2 à 4/100 au maximum.

60. Quant à l'isolement, on peut, dans les installations fixes en assurer le maintien et l'invariabilité relative, puisque tous les isolants et presque tous les conducteurs sont placés à l'intérieur d'un appartement et soustraits en majeure partie aux intempéries[1].

61. Moyennant les dispositions que j'ai indiquées, il ne

[1] Dans les installations en plein air des observations en campagne, cet avantage n'existe plus et, au contraire, ce mode de collection expose une plus grande surface de conducteur à la déperdition.

subsiste plus qu'une objection valable contre l'emploi de l'écoulement d'eau : celle qui repose sur l'occurence possible de congélation de l'eau.

Un fort débit pallie, dans une certaine mesure, à cet inconvénient. L'adjonction de glycérine ou d'alcool à l'eau du réservoir est évidemment indiquée si l'on veut suivre les variations d'un jour de forte gelée. Autrement, on peut obtenir des déterminations isolées ou suivre, d'une façon intermittente, en retirant le tube d'écoulement pour le dégeler, le dessécher, puis, le remettant en fonction par une ouverture brusque de l'écoulement.

Lors du travail entrepris aux États-Unis et dont nous avons déjà parlé, on avait, à Ithaca (Cornell University N.-Y.). monté le réservoir sur une table mobile sur galets ; de telle sorte qu'on pouvait aisément le faire mouvoir en avant ou en arrière, jusqu'à retirer au besoin le collecteur tout entier dans l'intérieur de la salle chauffée.

Le moyen le plus efficace pour éviter la congélation est sans contredit celui qui a été imaginé et employé par M. S. A. Andrée au cap Thordsen (Spitzberg), en 1882-83. Ce moyen consistait à faire passer le tube d'écoulement dans des gaines de grosse toile de lin (de 85 millimètres de diamètre) remplies de carex et de laine. Moyennant quelques précautions et quelques soins de détail, « l'activité du collecteur ne s'arrêta pas », assure M. Andrée[1], « même à la température la plus basse observée pendant l'hiver, savoir — 35° 6 ».

62. Ainsi, malgré ses quelques imperfections, le procédé de l'écoulement d'eau s'adapte avec avantage et d'une façon parfaitement suffisante à l'observation continue et enregistrée des variations du potentiel électrique de l'atmosphère.

[1] Voir la description du dispositif dans : *Observations faites au cap Thordsen Spitzberg, par l'expédition suédoise*, t. II : 2, *El. atm.* par S. A. Andrée, Stockholm, 1887.

Classe II.

63. Le principe des méthodes de cette classe a été présenté de la façon suivante par Sir W. Thomson[1] :

Si une grande feuille de métal était posée à plat sur le sol dans un endroit parfaitement horizontal, et si un disque du même métal était posé sur cette feuille ; puis, qu'à la manière d'un plan d'épreuve de Coulomb ce disque fût soulevé par un manche isolant et porté à un électromètre situé à l'intérieur d'un appartement, on obtiendrait une mesure de l'électrisation de la terre à cet instant. De même, si un globe, placé à l'extrémité d'une tige conductrice dressée en plein air, était enlevé de cette position, au moyen d'un support isolant, et porté à un électromètre intérieur, on aurait encore, d'après le même principe, une mesure de l'électrisation de la terre à cet instant. Il résulte en outre d'un théorème de Thomson[2] que, si la hauteur de la sphère est égale à 1/16 de la circonférence du disque employé dans le premier cas, les indications électrométriques seront les mêmes, pourvu que le diamètre de la sphère soit petit, en comparaison de la hauteur au-dessus du sol, et que la capacité de l'électromètre soit assez petite pour ne pas prendre une proportion considérable de l'électricité de la sphère à son contact.

64. Les résultats ainsi obtenus se rattachent d'ailleurs à ceux que donnent les méthodes de la première classe, par les considérations théoriques suivantes[3] :

Supposons qu'une sphère conductrice soit portée dans l'air, à la place de la pointe d'un bon collecteur, et mise en communication avec le sol par une tige ou plutôt un fil de capacité très faible ; pour que le potentiel de cette sphère se maintienne

[1] W. Thomson, *Reprints of papers*, § 265, p. 206.
[2] Id., *ibid.*, § 235.
[3] Mascart, *Traité d'El. st*, t. II, p. 570.

égal à zéro, il faut que sa surface se recouvre d'une quantité d'électricité capable d'y produire un potentiel égal et de signe contraire à celui que l'électricité de l'atmosphère possède sur ce conducteur. Si le potentiel de l'électricité atmosphérique est positif et égal à V au centre de la sphère, celle-ci se chargera d'une certaine quantité — M d'électricité négative. En désignant par R le rayon de la sphère, on aura donc pour le centre

$$V - \frac{M}{R} = 0 \text{ ou } M = VR.$$

La sphère étant alors isolée et placée dans un appartement, c'est-à-dire dans une enceinte au potentiel o, elle s'y trouvera, par sa charge propre au potentiel V. C'est ce potentiel même, c'est-à-dire le potentiel atmosphérique au point primitivement occupé par la sphère, qu'on mesurerait à l'électromètre si la capacité de celui-ci pouvait être nulle. On mesurera en réalité un potentiel proportionnel à V, le coefficient de proportionnalité étant constant et égal au rapport $\frac{R+C}{R}$.

Le résultat ainsi obtenu reçoit donc la même interprétation que celui qu'on obtient avec le collecteur. En tenant compte des coefficients respectifs, ces deux résultats sont numériquement égaux, mais de signe contraire.

Si le conducteur exposé n'a pas la forme sphérique, la quantité d'électricité dont il se charge est encore proportionnelle au potentiel de l'air en un point particulier du conducteur et pourra servir de même à étudier les variations de l'état électrique de l'air.

65. Théoriquement, cette méthode présente sur celle du collecteur l'avantage de reposer sur un principe bien défini correspondant à la mise en équilibre électrique instantanée du conducteur. Le rendement n'y est plus soumis qu'à une cause de variation : celle de l'isolement ; le facteur débit n'intervenant pas.

66. Mais, dans la pratique, cet avantage est contrebalancé par les inconvénients qui résultent du temps nécessaire au transport du conducteur et à la mesure de sa charge. Ces inconvénients sont les suivants : 1° les déterminations sont forcément interrompues et les variations parfois brusques du potentiel échappent à l'observation ; 2° pendant ce temps, le conducteur subit des pertes d'autant plus importantes et plus variables qu'il expose à l'air une surface étendue et chargée négativement et que l'isolant est exposé avec lui à toutes les intempéries de l'air extérieur.

67. Ces inconvénients existent notamment dans le procédé de Peltier ou de Lamont et dans celui de Dellman : dans le premier, l'électromètre est relié directement au conducteur sphérique et déplacé avec lui ; dans le second, la sphère est seule exposée à l'extrémité de sa tige isolante et portée à l'électromètre intérieur fixe.

Ces procédés ont été employés : le premier par Peltier lui-même à Paris (d'une façon peu suivie) ; par Quételet [1], de 1845 à 1862, à Bruxelles, où il a été longtemps encore en usage [2] ; par Lamont, à Munich, en 1850-51, et par Duprez, à Gand, de 1855 à 1863; le deuxième par Dellman, à Kreuznach, de 1852 à 1862 et par Wislizenus à Saint-Louis, Mo. (E.-U.), de 1861 à 1872 [3].

Aux inconvénients généraux de la méthode s'ajoutaient les imperfections des électromètres employés, qui dérivaient tous plus ou moins de la balance de Coulomb [4].

[1] Quételet, *Météorologie de la Belgique*, p. 205 et suiv., 1867.

[2] C'est le seul que décrivent MM. Houzeau et Lancaster dans le chap. « El. Atm. » de leur *Traité élém. de Météorologie*, 1880. Ils le considèrent comme un des mieux appropriés à l'étude de l'électricité de la terre.

[3] Les appareils, les méthodes et les résultats des observations de ces physiciens sont examinés en détail dans le mémoire de H. Hamberg : *Om den s. k. luftelektriciteten*. Upsala, 1872.

[4] MM. Elster et Geitel ont fait un judicieux emploi de la méthode de Peltier pour leurs observations normales au sommet du Sonnblick, en se servant de l'électromètre d'Exner et d'un conducteur cylindrique isolé de 10 centimètres

68. On a remédié, jusqu'à un certain point, au dernier inconvénient de la méthode en abrégeant le plus possible le temps nécessaire au déplacement du conducteur et à la mesure de sa charge.

Dans les procédés employés à cet effet, le principe de la méthode reste le même, mais la marche suivie est inverse de la précédente. Ainsi le conducteur, au lieu d'être porté de la région de l'atmosphère au potentiel V, à l'enceinte au potentiel o, est au contraire élevé de l'enceinte au potentiel o au lieu de potentiel V ; de telle sorte que l'on mesure directement, dans ce cas, une quantité proportionnelle à la charge (généralement positive) développée, par l'influence du champ terrestre, sur la partie inférieure du conducteur à l'état neutre : cette charge étant elle-même proportionnelle à la différence entre le potentiel o du sol et celui V de la couche d'air qui passe par la ligne neutre sur le conducteur.

69. C'est à cette méthode que se rapporte le mode d'observation employé par de Saussure avec son électromètre atmosphérique à tige transportable (1785). Contrairement à ce que disent ou laissent entendre tous les traités classiques, cette tige, longue de 24 pouces et faite en trois parties démontables, ne fonctionnait pas comme une pointe, mais comme un conducteur mobile; une extrémité aiguë (que de Saussure ne mentionne d'ailleurs pas) l'eût exposé au contraire à des déperditions nuisibles [1].

de longueur et 6 centimètres de diamètre. (*Sitzungsberichte*, Wien., t. CII, p. 1300, 1893.)

[1] Voici en effet l'opération par laquelle de Saussure mesurait habituellement l'électricité de l'air : « Je choisis, dit-il (*Voyages dans les Alpes*, t. II, p. 175 et suiv.), un lieu découvert, éloigné des arbres et des maisons; j'arme l'électromètre de son conducteur; puis, pour donner au fluide électrique renfermé dans l'électromètre un degré de densité égal à celui que contient la surface de la terre, je le saisis par son fond, puis je me baisse pour faire toucher la terre tout à la fois au conducteur et au fond de l'instrument; ensuite je le relève, la pointe en haut, et je le porte à la hauteur de l'œil : là, j'observe la quantité de lignes ou de quarts de ligne dont les boules s'écartent; puis,

70. Une application rigoureuse de cette méthode a été faite par Hankel et Sir W. Thomson, avec les dispositifs suivants : *Hankel*[1] fixait directement à la feuille d'or de son électromètre, le conducteur atmosphérique qui consistait en un long tube de laiton vertical. Ce tube était entouré d'une gaine de tôle reposant sur la cage de l'instrument reliée au sol. Pour faire une observation, on expose convenablement l'instrument au dehors, le conducteur entouré de sa gaine. On enlève alors soigneusement la gaine ; l'observateur se place dans une position déterminée une fois pour toutes afin de ne pas causer une influence perturbante dans la distribution de l'électricité sur le conducteur, et observe l'écart.

71. L'appareil de *Sir Thomson*[2] consiste en un vase de métal cylindrique renversé et supporté par une tige de verre qui se trouve ainsi abritée dans une sorte de chambre desséchée à l'acide sulfurique (imaginons un isolateur Mascart). Cette tige de verre est portée par une barre de fer qui élève ainsi le conducteur creux à 2 pieds environ au-dessus du toit du bâtiment. Une sorte de vase ouvert par le haut glisse de haut en bas, le long de la barre de fer qui passe par un trou ménagé dans le fond du vase. Ce vase, supporté par un tube avec un système de poulies, peut à volonté être élevé ou abaissé. Un fil

en tenant l'électromètre toujours droit, je l'abaisse ou le rapproche graduellement de terre; je vois alors les boules se rapprocher peu à peu l'une de l'autre; je note la hauteur à laquelle se trouve la cime du conducteur, au moment où les boules sont sur le point de se toucher; cette hauteur est la distance de la terre à laquelle l'électricité de l'air commence à être sensible, etc. » De Saussure note d'ailleurs qu'il ne se développe sur son conducteur aucune électricité permanente : c'est précisément le caractère qui distingue cette méthode de celle des pointes et de celle de Cavallo ou de Peltier.

[1] Hankel, Ueber die Messung der atmosphärischen Elektricität nach absolutem Maasse (*Abh. der math. phys. Class. der k. sæchs. Gesellschaft der Wiss*, Bd. III, p. 381-599, et Hamberg, *loc. cit.*, p. 39).

[2] Sir Thomson avait installé cet appareil sur le toit de la salle de conférences de l'Ile d'Arran. La descripion ci-jointe, extraite de *Reprints of papers*, § 391, p. 311, fut transmise à la *Literary and phil. Soc. of Manchester*, le 8 mars 1859.

métallique attaché au conducteur isolé passe par un large trou au fond du vase et est tenu par un support isolant à l'intérieur du bâtiment, de telle sorte qu'il puisse être relié à l'électromètre ou au sol. Pour faire une observation, le fil est relié à la terre pendant que le vase est élevé et enveloppe le conducteur, ce qui est la position normale quand l'appareil ne sert pas. La communication au sol est alors enlevée et le vase est descendu à 18 pouces au-dessous environ.

L'électromètre *(Divided-ring electrometer)* marque immédiatement une déviation correspondante au potentiel de l'air en un certain point du conducteur. L'isolement était si bon que les déviations pouvaient, parait-il, être observées pendant un quart d'heure et plus, et, quand le vase était relevé, l'électromètre revenait sensiblement à zéro, montrant quelque déviation à peine sensible quand la communication au sol était établie avant de faire une nouvelle expérience.

72. Ni l'un ni l'autre de ces appareils n'a été, que je sache, employé à des observations régulières. Ils possèdent cependant sur ceux de Peltier et de Dellman l'avantage de permettre la mesure plus rapide, presque instantanée, de la charge d'influence développée sur le conducteur. Si l'isolement, qui se fait au dehors, est encore exposé aux variations provenant de l'air extérieur, ces variations ont moins d'importance, d'une part, et peuvent, d'autre part, être appréciées ainsi que l'indique Sir Thomson.

73. Palmieri a réuni ces qualités dans l'*appareil à conducteur mobile*, qu'il a mis en usage depuis 1850, d'abord avec un électroscope de Bohnenberger, puis plus tard, vers 1864, avec son électromètre bifilaire[1].

Quoiqu'il soit en général plus aisé de maintenir isolé un

[1] Palmieri, « La description de ces instruments a paru dans un grand nombre de Revues et de Mémoires italiens, allemands et français. » Hamberg *(loc. cit.*, p. 34) l'a extraite de : *Zeitschrift für Meteorologie von Jelinek und Hann*, vol. V. Elle est donnée en détail dans : *Lois et Origines de l'El. atm.*, trad. Marcillac, Paris, 1885.

conducteur fixe qu'un conducteur mobile (surtout si l'on veut que les isolants restent à l'abri à l'intérieur), il y a dans l'emploi de celui-ci un avantage qui a été heureusement utilisé par Palmieri dans le cas où l'isolement est douteux. Cet avantage consiste en ce que l'on peut disposer la communication du conducteur avec l'électromètre de telle façon qu'elle se rompe à l'instant où le conducteur arrive au haut de sa course. On obtient ainsi, à l'électromètre, un arc impulsif qui est lié par une relation simple à l'arc définitif que donnerait la charge du conducteur au repos sans déperdition[1].

74. Maintenant il faut remarquer que le point de l'air dont le conducteur prend le potentiel peut varier le long du conducteur avec la distribution des masses influentes, et cela d'autant plus que ce conducteur est plus allongé dans le sens vertical. Il s'ensuit que les variations du potentiel obtenues ne se rapportent pas exactement au même point invariable de l'atmosphère.

Ce petit défaut qui existe dans le dispositif de Hankel est très atténué dans celui de Thomson et subsiste encore dans celui de Palmieri, car le conducteur, quoique formé d'un disque plat de 0^m27 de diamètre, y est soutenu par un tube de laiton de 0^m01 de diamètre et de 1^m50 de longueur, c'est-à-dire de capacité appréciable.

75. Le dispositif de Palmieri présente, en outre, une particularité qui doit faire modifier l'interprétation des résultats obtenus par son moyen. Dans ce dispositif, en effet, le conducteur n'est pas entièrement recouvert par le sol : le disque est toujours élevé de quelques centimètres au-dessus du toit de la chambre d'observation. Mis en communication avec le sol dans cette position, ce conducteur se recouvre d'une quantité d'électricité proportionnelle et de signe contraire au potentiel

[1] Ce procédé rappelle celui qu'employait de Saussure avec la balle de plomb lancée en l'air et entraînant son fil conducteur qui se détachait finalement de l'électromètre; de même que les flèches de Becquerel et Breschet.

de l'air au niveau du disque. Quand, donc, le conducteur est ensuite isolé et élevé à $1^{m}50$ plus haut, il prend le potentiel correspondant à ce dernier niveau, diminué du potentiel de sa charge primitive. On mesure donc en réalité la chute de potentiel correspondant à un déplacement vertical de $1^{m}50$; et il en est ainsi quelle que soit la hauteur du disque au-dessus du sol, dans sa première position [1].

Cette chute de potentiel est, dans tous les cas, proportionnelle à l'*intensité du champ* électrique de la terre au lieu considéré. Elle pourra avoir la même valeur entre $0^{m}10$ et $1^{m}60$ qu'entre $1^{m}15$ et 3 mètres au-dessus du sol. Il suffit que les surfaces de niveau soient parallèles et également resserrées depuis le sol jusqu'à 3 mètres, comme elles le seraient peut-être au-dessus d'une grande étendue de terrain plat et uni, si l'observateur, ses appareils ou sa maison, n'apportaient pas un trouble local dans la distribution électrique. Si ce trouble pouvait être déterminé, c'est-à-dire si *l'exposition* pouvait être bien définie, l'appareil de Palmieri donnerait immédiatement la mesure de la *chute normale de potentiel* (dont parle M. Exner) et, par suite, de la densité électrique de la charge du globe au lieu considéré [2].

[1] Palmieri entend qu'il mesure ainsi « l'intensité de l'influence ou, si l'on veut, dit-il, le *potentiel*, d'une électricité inductrice dont on ne connaît ni l'intensité, ni la distance ».

Par suite de cet emploi impropre du mot potentiel, Palmieri ne fait pas de distinction entre ses résultats et ceux que donnent les autres méthodes : ainsi, à son avis, on exprime une idée fausse lorsqu'on dit qu'on mesure le potentiel de l'air à l'altitude où se trouve le collecteur.

[2] La méthode de Palmieri a été employée : par *lui-même* à l'Observatoire du Vésuve depuis 1850. Les professeurs Eugène Semmola et Faustin Brioschi continuent les observations à Naples et autour de Naples.

Secchi employait à Rome le conducteur de Palmieri avec un électroscope gradué de Bohnenberger (l'écart de la feuille d'or se fait plus vite que celui de l'aiguille dans l'électromètre bifilaire). Il réduisait d'ailleurs la course du conducteur de $1^{m}50$, employée par Palmieri, à 1 mètre. Des observations régulières ont été faites à l'Observatoire de Moncalieri et au Petit Saint-Bernard (2160 m.) sous la direction du P. Denza, qui a publié les résultats

76. On a utilisé le principe de ces méthodes dans la construction d'appareils à indications continues.

Le premier, dû à Palmieri[1], présente des difficultés d'isolement qui, de l'aveu de l'auteur lui-même, en restreignent l'usage aux journées calmes et sereines. Il consiste en une roue à huit rayons conducteurs, tous isolés sur l'axe et terminés par des lames circulaires d'environ 0^m10 de diamètre. Cette roue tournant autour d'un axe horizontal, deux ressorts de laiton touchent les rayons au moment où ceux-ci arrivent à la verticale supérieure et à la verticale inférieure. Ces ressorts représentent les deux pôles de l'appareil, le premier positif, le second négatif; de sorte qu'en mettant un de ces réophores en communication avec l'électromètre et l'autre avec le sol, on peut obtenir l'une et l'autre électricité. Dans le dernier dispositif qu'il décrit[2], Palmieri réunit les ressorts à deux condensateurs et présente l'appareil comme « collecteur de l'électricité atmosphérique donnant des étincelles par un ciel pur, sans pluie ou bourrasque à distance ».

Cette *machine électrique atmosphérique* est intéressante, mais nullement pratique pour l'étude de l'électricité atmosphérique.

77. Le *collecteur mécanique* construit en 1888 sur les plans du professeur Rowland et du Serg. Morrill, de Baltimore, Md. (E.-U.), présente, au contraire, l'avantage de l'isolement abrité d'un conducteur fixe. C'est le procédé de Thomson opposé à celui de Palmieri.

Cet appareil a été utilisé pour les observations simultanées entreprises aux Etats-Unis, mais trop peu de temps pour

des douze années, de 1867 à 1878 (dans *C. R.*, t. LXXXIX, p. 153. 1879.) Il employait concurremment l'électromètre bifilaire et l'él. de Bohnenberger.

L. Palmieri a publié ses résultats dans divers mémoires, notamment dans *Lois et Origines...*, et des séries de courbes de variations électriques dans l'édition de 1883 de ses *Nuove lezioni di fisica sperimentale e di fisica terrestre*, Naples, Giovanni Jovene, édit. strada della Quercia, 18.

[1] Palmieri, *Lois et Origines*, p. 28.

[2] Palmieri, *la Lumière électrique*, 15e année, t. XLVII, p. 506.

Fig. 1.

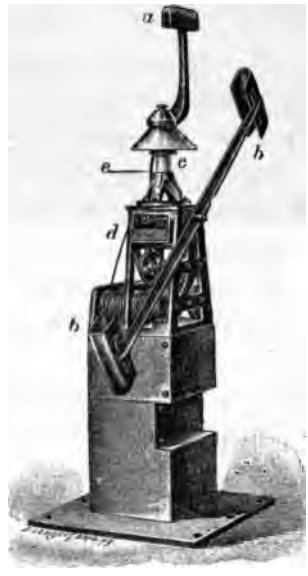


Fig. 2.

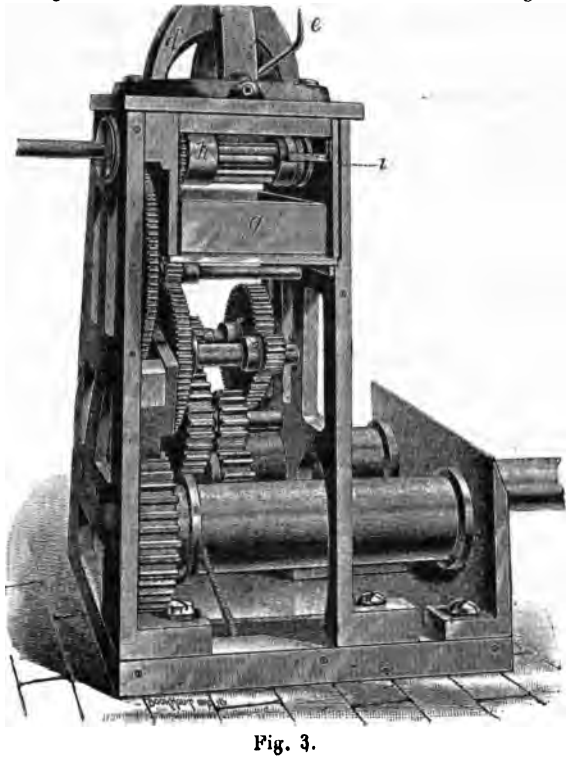


Fig. 3.

PLANCHE II. — Collecteur mécanique du Professeur Rowland.

Classe II.

63. Le principe des méthodes de cette classe a été présenté de la façon suivante par Sir W. Thomson[1] :

Si une grande feuille de métal était posée à plat sur le sol dans un endroit parfaitement horizontal, et si un disque du même métal était posé sur cette feuille ; puis, qu'à la manière d'un plan d'épreuve de Coulomb ce disque fût soulevé par un manche isolant et porté à un électromètre situé à l'intérieur d'un appartement, on obtiendrait une mesure de l'électrisation de la terre à cet instant. De même, si un globe, placé à l'extrémité d'une tige conductrice dressée en plein air, était enlevé de cette position, au moyen d'un support isolant, et porté à un électromètre intérieur, on aurait encore, d'après le même principe, une mesure de l'électrisation de la terre à cet instant. Il résulte en outre d'un théorème de Thomson[2] que, si la hauteur de la sphère est égale à 1/16 de la circonférence du disque employé dans le premier cas, les indications électrométriques seront les mêmes, pourvu que le diamètre de la sphère soit petit, en comparaison de la hauteur au-dessus du sol, et que la capacité de l'électromètre soit assez petite pour ne pas prendre une proportion considérable de l'électricité de la sphère à son contact.

64. Les résultats ainsi obtenus se rattachent d'ailleurs à ceux que donnent les méthodes de la première classe, par les considérations théoriques suivantes[3] :

Supposons qu'une sphère conductrice soit portée dans l'air, à la place de la pointe d'un bon collecteur, et mise en communication avec le sol par une tige ou plutôt un fil de capacité très faible ; pour que le potentiel de cette sphère se maintienne

[1] W. Thomson, *Reprints of papers*, § 265, p. 206.
[2] Id., *ibid.*, § 235.
[3] Mascart, *Traité d'El. st*, t. II, p. 570.

égal à zéro, il faut que sa surface se recouvre d'une quantité d'électricité capable d'y produire un potentiel égal et de signe contraire à celui que l'électricité de l'atmosphère possède sur ce conducteur. Si le potentiel de l'électricité atmosphérique est positif et égal à V au centre de la sphère, celle-ci se chargera d'une certaine quantité — M d'électricité négative. En désignant par R le rayon de la sphère, on aura donc pour le centre

$$V - \frac{M}{R} = 0 \text{ ou } M = VR.$$

La sphère étant alors isolée et placée dans un appartement, c'est-à-dire dans une enceinte au potentiel o, elle s'y trouvera, par sa charge propre au potentiel V. C'est ce potentiel même, c'est-à-dire le potentiel atmosphérique au point primitivement occupé par la sphère, qu'on mesurerait à l'électromètre si la capacité de celui-ci pouvait être nulle. On mesurera en réalité un potentiel proportionnel à V, le coefficient de proportionnalité étant constant et égal au rapport $\frac{R+C}{R}$.

Le résultat ainsi obtenu reçoit donc la même interprétation que celui qu'on obtient avec le collecteur. En tenant compte des coefficients respectifs, ces deux résultats sont numériquement égaux, mais de signe contraire.

Si le conducteur exposé n'a pas la forme sphérique, la quantité d'électricité dont il se charge est encore proportionnelle au potentiel de l'air en un point particulier du conducteur et pourra servir de même à étudier les variations de l'état électrique de l'air.

65. Théoriquement, cette méthode présente sur celle du collecteur l'avantage de reposer sur un principe bien défini correspondant à la mise en équilibre électrique instantanée du conducteur. Le rendement n'y est plus soumis qu'à une cause de variation : celle de l'isolement ; le facteur débit n'intervenant pas.

DEUXIÈME PARTIE

EXPLORATION ÉLECTRIQUE DE L'ATMOSPHÈRE

CHAPITRE PREMIER

HISTORIQUE

78. L'exploration électrique de l'atmosphère date naturellement de la découverte même de l'électricité météorique. Dans l'esprit de Franklin, une pointe métallique en communication avec le sol devait agir d'autant plus énergiquement pour soutirer le fluide électrique, qu'elle serait plus rapprochée des nuages qui étaient censés contenir ce fluide. C'est ainsi que le physicien de Philadelphie eut l'idée de se servir d'un cerf-volant armé d'une pointe, et qu'il réalisa sa mémorable expérience du 22 juin 1752.

Les effets qu'il obtint de cette façon étaient beaucoup plus intenses que ceux qu'on pouvait obtenir au moyen d'une simple barre pointue élevée sur un édifice : d'après l'idée admise, ce fait n'avait rien qui pût surprendre.

79. Cependant Romas, après une série d'expériences sur les effets obtenus au moyen de barres pointues plus ou moins inclinées, ayant eu également l'idée d'élever des cerfs-volants électriques, obtint toujours, même en l'absence de tout nuage, des effets électriques d'autant plus intenses que le cerf-volant

était plus élevé. C'est ce qu'il rapporte dans un mémoire daté de 1755[1].

80. Ce résultat, contrôlé au moyen de cerfs-volants par Musschenbrock, Beccaria, Cavallo, devint d'observation commune, au moins pour les faibles hauteurs. C'est en se fondant sur ce fait que de Saussure imagina le procédé de la balle de plomb lancée en l'air, au moyen de laquelle il obtenait toujours de l'électricité, « alors que celle-ci était trop faible pour se manifester près du sol ». Schübler[2] chercha à vérifier le fait en observant la déviation d'un électromètre placé à des hauteurs croissantes sur le côté d'une tour, de manière à laisser autant que possible une même distance de cinq pieds entre sa tige et le mur. Par un ciel parfaitement serein, il observa une déviation positive croissant notablement avec la hauteur.

81. Becquerel et Breschet firent des expériences sur un des plateaux qui avoisinent l'hospice du Grand Saint-Bernard, au moyen d'une flèche munie d'un fil conducteur de 80 mètres de long, dont l'extrémité était légèrement nouée au crochet d'un électromètre à pailles. Le fil, d'abord déroulé sur un morceau de taffetas gommé étendu à terre, était élevé rapidement ; il se détachait alors de l'électromètre par la traction de la flèche. Les résultats de ces expériences furent : 1° que, sur les hautes montagnes, dans les temps sereins, l'électricité augmente en intensité à partir du sol jusqu'à une hauteur au moins égale à 80 mètres, limite atteinte ; 2° que cette électricité reste

[1] *Mémoire où après avoir donné un moyen aisé pour élever fort haut et à peu de frais un corps électrisable isolé, on rapporte des observations frappantes qui prouvent que plus le corps isolé est élevé au-dessus de la terre, plus le feu de l'électricité est abondant*, par M. de Romas, assesseur au présidial de Nérac, publié dans les *Mémoires des savants étrangers*, à l'Académie des Sciences (*Mémoires de Mathématiques et de Physique*, présentés à l'Académie royale des Sciences de Paris, par divers savants, et lus dans les *Assemblées publiques*, 1755, t. II, p. 393 et suivantes).

[2] Voy. Duprez, Mémoire sur l'élect. de l'air (*Mém. des savants étrangers*, t. XVI, Bruxelles, 1843.)

toujours positive sans aucune apparence de changement de signe[1].

82. Gay-Lussac et Biot, dans leur mémorable ascension aérostatique, avaient trouvé également par un ciel parfaitement serein que la déviation de l'électromètre croissait avec la hauteur[2].

83. D'après le mode de fonctionnement admis jusqu'à Peltier pour les appareils électro-atmosphériques, la conclusion de toutes les observations de ce genre était que de l'électricité positive est répandue dans l'atmosphère et que sa densité augmente à mesure qu'on s'élève.

84. Cependant Ermann avait montré que l'électricité manifestée par les instruments est due à l'influence et non au contact et que, par suite, l'augmentation que l'on observe quand on s'éloigne du sol s'explique dans l'hypothèse de la terre seule électrisée négativement. Cette idée ne fut reprise que trente-cinq ans plus tard par Peltier qui donna du phénomène une interprétation conforme aux données actuelles de la science électrique.

85. Néanmoins le langage de ce physicien présente encore des ambiguïtés qui masquent parfois le sens véritable des phénomènes, ambiguïtés qui de nos jours encore et malgré la précision de langage introduite dans la science depuis Sir W. Thomson, ont occasionné des divergences apparentes d'opinion entre les physiciens de l'école de Thomson et ceux de l'école de Palmieri, gardienne de l'ancien langage. J'ai déjà montré dans le chapitre précédent (§ 75) d'où provenait ce malentendu. J'espère élucider ici complètement la question.

86. Peltier reconnaît d'abord, au moyen d'un électromètre à boule successivement élevé et mis en équilibre électrique avec le sol, puis abaissé, que tout se passe au voisinage de la surface comme si la terre seule avait une charge négative en équilibre électrostatique. Il admet ensuite cette hypothèse

[1] Becquerel, *Traité d'Electricité et de Magnétisme*, t. IV, p. 110, 1836.
[2] *Journal de physique*, t. LIX, p. 315, 1804.

comme base de sa théorie de l'électricité atmosphérique et comme conséquence de sa théorie générale de l'électricité. Il en infère alors que la *tension résineuse* de la terre augmente dans les points de sa surface qui font une saillie dans l'espace et que, sur les montagnes un peu élevées, cette tension atteint une puissance extraordinaire. Ailleurs[1], de même qu'il dit que les électromètres ne marquent que la différence qu'il y a entre la *tension* électrique de la tige supérieure et le milieu où plongent les feuilles d'or, de même, parce que les feuilles d'un électroscope divergent de plus en plus à mesure qu'un cerf-volant s'élève, il conclut que la *tension* positive de l'atmosphère croît avec la hauteur. Il ajoute : « Le fait constant que nous avons trouvé pendant les jours secs et sereins, c'est que l'*électricité positive* croissait jusqu'au maximum de hauteur que nous avons pu atteindre[2].

D'après les définitions actuelles de la science électrique, il est donc évident que, dans la première acception, le mot *tension* correspond à l'*intensité* ou *force du champ terrestre* $\left(\frac{dV}{dn}\right)$, à la *chute de potentiel* $\left(\frac{\text{volts}}{\text{mètres}}\right)$ (potentialgefälle des Allemands), et que, dans la deuxième acception, le mot *tension* que Peltier fait synonyme d'*électricité*, correspond à ce que nous appelons le *potentiel* V (différence de potentiel entre un point de l'air et le sol).

87. Ainsi entendue, la conclusion des observations de Peltier, conforme à sa théorie et conforme à toutes les observations antérieures et postérieures, est donc celle-ci : *Par beau temps, ciel serein, air calme et limpide, le potentiel électrique du globe terrestre, à peu près uniforme au même instant sur toute sa surface formée de substances conductrices, croît en général avec la hauteur libre.*

On sait d'autre part que, pour une petite portion au moins de

[1] *C. R.*, 1841, 1er semestre, t XII, p. 307.
[2] *C. R.*, 1840, 1er semestre, t. X, p. 712.

la surface du globe, *si l'on ne considère que le premier élément de la vitesse d'accroissement du potentiel par rapport à la hauteur, cette vitesse* $\left(\frac{dV}{dn}\right)$ *qui représente l'intensité du champ varie au-dessus des différents accidents de la surface proportionnellement à la densité d'une charge négative distribuée sur le sol conformément aux lois de l'équilibre électrostatique.*

Telle est l'expression correcte de deux faits constants de l'électricité atmosphérique.

Cette expression n'implique aucune théorie particulière relative à l'origine ou au siège de l'agent dont nous étudions les manifestations naturelles et, dans les limites que nous leur assignons, ces faits sont généralement reconnus.

88. Cependant, soit qu'on énonce ces faits en employant des expressions moins précises, soit qu'on les comprenne dans des limites beaucoup plus étendues, l'accord entre les physiciens cesse, mais seulement en apparence. Il importe donc de ne pas laisser subsister de malentendu.

Ainsi Palmieri, rappelant les résultats obtenus au moyen de cerfs-volants, dit : « Dans les temps ordinaires, l'observateur tenant le fil en communication avec le sol note de l'électricité positive toujours croissante avec la hauteur et de là naît la croyance vulgaire que l'électricité croît avec la hauteur. » Et en maints endroits, Palmieri fournit des arguments pour combattre cette prétendue croyance.

Il y a donc équivoque, et cette équivoque, il est évident que c'est Palmieri lui-même qui l'a créée en introduisant dans l'énoncé d'un fait l'idée préconçue de fluide électrique libre dans l'air.

Il résulte de la lecture des nombreuses notes que Palmieri a publiées sur la question, qu'il désigne par le terme général d'*électricité*, ce qui résulte de l'indication de son appareil à conducteur mobile, lequel donne, comme il le dit lui-même, « la différence de potentiel entre le point le plus bas d'où le conducteur s'élève et le point le plus élevé qu'il

atteint[1] », c'est-à-dire, en définitive, la chute verticale de potentiel.

Nous devons en conséquence traduire la thèse de Palmieri en ces termes précis : *l'intensité du champ électrique terrestre ne croît pas avec la hauteur.* Mais la loi d'accroissement avec la hauteur énoncée plus haut se rapporte au potentiel et non à la chute verticale de potentiel. Ce sont donc là deux faits différents et non contradictoires.

89. Cela étant établi, nous allons maintenant discuter la thèse de Palmieri en tant que résultat d'observations. Ces observations ont été faites au moyen du conducteur mobile à la surface du globe, en des points d'altitudes différentes, à Naples (57m.) et sur le Vésuve (637m.). Les observations du P. Denza, faites par la même méthode à Moncalieri (259m.) et au Petit Saint-Bernard (2160 m.) l'ont conduit au même résultat : « La tension électrique, dans les conditions normales de l'atmosphère, diminue avec l'altitude[2]. »

La loi de variation de la chute de potentiel énoncée par Palmieri ne se rapporte donc pas à la hauteur libre; elle indique seulement une certaine distribution de la couche électrique à la surface du globe.

90. Il suivrait de là que, pour des points de niveaux très différents, la distribution n'est pas conforme aux lois de l'équilibre électrostatique. Ce résultat, en contradiction avec la théorie de M. Pellat et celle de M. Exner peut provenir de causes locales ou générales. M. Exner et après lui M. Ch. André avaient essayé de l'expliquer par la topographie relative des lieux d'observation, d'après laquelle le rapprochement ou l'éloignement des surfaces de niveau au voisinage du sol accidenté est parfois difficile à figurer.

91. Mais Palmieri a montré[3] que, dans son cas du moins,

[1] Palmieri, *Lumière électrique*, t. XLVII, p. 169, 1893.
[2] *C. R.*, 1879, 2e semestre, t. LXXXIX, p. 155.
[3] Palmieri, *Lumière électrique*, t. XLVII, p. 167, 1893.

cette manière de voir n'est pas justifiée. De plus, d'après Palmieri et Denza, les résultats qu'ils ont obtenus se rapportent aux conditions normales de l'atmosphère.

92. On doit donc admettre que ces résultats sont dus à l'influence de masses électriques répandues dans l'air.

La question serait de savoir si les masses influentes appartiennent exclusivement aux couches d'air en contact avec le sol ou si, au contraire, elles dépendent d'une distribution générale à laquelle doivent se rapporter, tout aussi bien ces variations en hauteur que les variations périodiques différentes que l'on observe à différents niveaux.

Dans tous les cas, des résultats tels que les précédents ne pourront être interprétés d'une façon satisfaisante que lorsque cette question sera résolue, en se plaçant dans le cas où les surfaces de niveau ne sont pas déformées par le voisinage du sol conducteur, c'est-à-dire dans le champ libre par des observations en ballon.

De Saussure avait remarqué, dans ses observations en montagnes, l'importance des influences locales. Il en avait déjà conclu de même qu'il n'y a que des expériences en ballon qui puissent nous conduire à connaître avec une certitude suffisante la loi que suit à différentes hauteurs « la densité du fluide électrique[1] ». Il avait même indiqué un plan d'expériences admirable dont la science moderne a justifié le principe méconnu jusqu'à ces dernières années. Je le ferai connaître plus loin.

Toute ambiguïté d'expressions étant désormais écartée, je passe à l'examen des méthodes d'observation employées pour l'exploration du champ électrique de l'atmosphère et à la discussion de leurs résultats.

[1] *Voyages dans les Alpes*, t. II, § 835.

CHAPITRE II

DISCUSSION DES MÉTHODES ET DES RÉSULTATS

93. L'exploration électrique de l'atmosphère a été faite par plusieurs procédés qui se ramènent à trois modes expérimentaux distincts donnant des résultats différents, que l'on doit interpréter conformément aux méthodes de collection électrique dont ils relèvent :

I. — *a)* L'observateur est sur le sol. Il dispose de l'extrémité inférieure d'un fil métallique isolé et relié à une des trois espèces de collecteur : pointe, mèche ou écoulement d'eau. Ce collecteur est porté par un système aérostatique captif quelconque : cerf-volant ou ballon captif.

b) L'observateur est dans l'aérostat. Il dispose, d'une part, d'un collecteur isolé et, d'autre part, d'une communication métallique constante avec le sol.

II. — Un observateur est sur le sol, un autre dans un aérostat captif. Ils disposent chacun d'une des deux extrémités d'un fil métallique isolé pendant l'ascension de l'aérostat.

III. — L'observateur est dans un aérostat libre, sans aucune communication avec le sol.

94. D'une façon générale, quand l'observateur peut mettre une *électrode* de son électromètre en communication métallique avec le sol, il mesure la différence de potentiel entre un point de l'air et le sol, c'est-à-dire le potentiel V en ce point de l'air. Quand, au contraire, l'observateur ne peut pas assurer une communication parfaite d'une électrode avec le sol, il ne mesure que la différence entre le potentiel d'un point de l'air et le potentiel indéterminé de cette électrode. Dans ce cas, la mesure ne sera

déterminée que si les deux électrodes sont en équilibre de potentiel avec deux points définis de l'air et alors on obtient la différence ou chute de potentiel entre les deux points de l'air. Si, en outre, les surfaces équipotentielles au niveau de ces deux points, peuvent être considérées comme horizontales, on aura en définitive la mesure de l'intensité du champ $\left(\frac{\text{volt.}}{\text{mèt.}} = \frac{dV}{dn}\right)$ à cette hauteur, en tenant compte de la distance verticale des deux points,

Or, la communication métallique avec le sol ne peut guère être assurée au delà de mille mètres [hauteur maxima à laquelle on peut encore tenir captif un aérostat monté quelconque; en général même on ne dépasse pas 500 mètres]; comme d'ailleurs, jusqu'à cette hauteur, le champ peut être considéré comme troublé accidentellement, il s'ensuit que la loi normale de variation du potentiel avec la hauteur ne peut résulter exactement que des mesures successives du rapport $\left(\frac{\text{volt.}}{\text{mèt.}}\right)$ faites en ballon libre.

C'est à ce mode d'observations qu'on s'est, du reste, arrêté en ces dernières années. Les deux autres modes, limités à l'emploi d'aérostats captifs, peuvent fournir des indications précieuses sur la nature des perturbations du champ au voisinage du sol et sont encore utilisés dans ce but. Mais les observations ainsi faites ayant été interprétées par quelques physiciens dans un sens plus général, il y a lieu d'examiner à ce titre les procédés qui ont été employés pour les recueillir.

Mode I.

95. Dans ce mode d'observation, la boîte de l'électromètre étant reliée au sol et l'électrode principale au collecteur, si ce collecteur était un égaliseur de potentiel parfait, on aurait à chaque instant le potentiel du point de l'air correspondant à

la hauteur atteinte par l'aérostat. Il suffirait donc de noter simultanément la déviation de l'électromètre et la hauteur de l'aérostat pour avoir la loi de variation cherchée. Mais, pratiquement, ces deux quantités ne sont pas corrélatives.

Si nous considérons les variations de hauteur inévitables et difficilement mesurables auxquelles est soumis un système aérostatique quelconque — cerf-volant ou ballon captif — et si nous examinons, d'après ce que nous en avons dit, le fonctionnement d'un collecteur porté par ce système, nous voyons que le potentiel mesuré à l'électromètre ne correspond à la hauteur évaluée de l'aérostat qu'à un coefficient près, variable lui-même avec la hauteur et généralement indéterminable.

Un collecteur quelconque emploie toujours, en effet, un certain temps pour se mettre en équilibre de potentiel; si donc, pendant ce temps, le potentiel varie d'une façon continue, comme il arrive par un déplacement vertical dans le champ terrestre, l'équilibre ne sera pas atteint. Il y aurait, par suite, lieu de tenir compte d'un coefficient résultant du rapport des variations dans le même temps du potentiel du collecteur et du potentiel de l'air le long de la trajectoire parcourue. Les collecteurs transportables étant assez lents et, au contraire, les variations du potentiel dans le sens vertical étant assez rapides, ce coefficient sera généralement élevé et d'ailleurs variable avec la vitesse verticale de l'aérostat.

Le coefficient de rendement propre du collecteur employé est, en outre, soumis aux variations accidentelles que nous avons signalées.

Ces deux coefficients, joints à celui qui provient d'une exposition insuffisante et peut-être variable à cause de la proximité de l'appareil aérostatique, sont autant de variables qui affectent les résultats de l'observation dans les deux procédés expérimentaux *a* et *b*.

96. Le procédé *a* est de plus soumis à une cause d'erreur qui résulte de ce que la capacité et les chances de perte du fil collecteur augmentent avec le développement de ce fil et,

par suite, systématiquement avec la hauteur. Cette dernière cause d'erreur affecte principalement les observations faites au moyen de pointes par le procédé du cerf-volant de Franklin. D'après ce que nous avons dit de ce procédé de collection, il semble en effet que l'augmentation de potentiel trouvée par son emploi doive recevoir une interprétation fondée sur le principe du fil explorateur de Beccaria et sur celui du conducteur mobile. On doit remarquer, du reste, que l'emploi des autres collecteurs de faible débit est, en définitive, sujet à une interprétation analogue qui rend peu concluants les résultats obtenus par la méthode I, *a*.

Palmieri dit à ce sujet : « Si l'on emploie des ballons captifs pourvus de lampions allumés, en négligeant même les erreurs provenant du peu d'électricité que développe la combustion et de la colonne d'air calme ou agitée qui s'élève plus ou moins abondamment, il est clair que le fil métallique, devenant plus long à mesure que le ballon s'élève, doit subir une influence plus grande; de sorte que, si l'aérostat atteignait les confins de l'atmosphère, on devrait avoir une influence maxima[1]. »

Pour Palmieri, la puissance collectrice des pointes est négligeable, et l'électricité croissante à l'extrémité inférieure du fil est évidemment induite et due au mouvement d'élévation de ce fil, comme la donnerait un conducteur mobile s'élevant de la même hauteur. On doit remarquer que, si l'ascension n'est pas rapide, il se produit des pertes qui altèrent beaucoup les résultats fournis ainsi par la simple élévation.

97. La méthode *b* échappe à cette critique, mais elle revient à observer sur des tours de plus en plus élevées. Elle présente donc à peu près tous les inconvénients et toutes les inexactitudes de ce procédé, sans en offrir les avantages pratiques. Au surplus, comme on parvient à obtenir des différences de potentiel considérables entre les conducteurs en présence, on s'expose à la production d'étincelles suffisantes pour enflammer

[1] Palmieri, *Lumière électrique*, t. XLVII, p. 168, 1893.

la masse gazeuse au voisinage de laquelle on opère. Il serait par suite dangereux de s'élever en ballon à de grandes hauteurs en restant en communication avec le sol et maintenant un conducteur bien isolé en relation avec un collecteur quelconque. M. Paul Marcillac avait fait un projet pour s'élever à de grandes hauteurs en restant relié au sol. Ce projet, dont M. Palmieri a fait l'éloge[1], consistait à s'élever au-dessus de la mer en ballon libre et à laisser traîner dans l'eau l'extrémité d'un câble métallique déroulé de la nacelle. D'après ce que j'ai dit, ce projet doit être abandonné.

98. Une autre raison qui doit faire rejeter les méthodes *a* et *b* pour les explorations à grande hauteur, c'est qu'il n'est pas possible de mesurer avec une égale précision des potentiels variant de 0 à plus de 100.000 volts.

99. On est cependant parvenu à quelques résultats dans l'application de la méthode *a*, en employant non plus des électromètres, mais des galvanomètres sensibles. En 1826, Colladon montra que la décharge continue d'une machine électrique reliée au sol agit sur l'aiguille aimantée comme un courant électrique ordinaire, en portant le pôle Nord vers la gauche du courant d'électricité positive. Il résulte d'ailleurs de ses expériences que la décharge est à peu près proportionnelle au débit de la machine[2].

Partant de là, Colladon éleva sur l'Observatoire du Collège de France une perche de 9 mètres portant un fil conducteur revêtu de soie et terminé par deux aiguilles fines un peu divergentes. Le fil descendant dans le laboratoire était relié à une borne d'un galvanomètre de 500 tours, dont l'autre borne communiquait avec le sol. Il obtint ainsi des déviations de l'aiguille, non seulement pendant les orages, mais encore pendant les jours où le ciel était simplement nuageux[3].

Peltier et Clarke adoptèrent ce procédé et en firent usage

[1] Palmieri, *Rend. c. della R. Acad. di Napoli*, 28 octobre 1893.
[2] Mascart, *Traité d'électricité statique*, t. I, p. 432.
[3] *Ann. de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXXIII, p. 62 et suiv.

pour étudier les variations de l'électricité avec la hauteur en élevant les pointes métalliques au moyen de cerfs-volants.

100. Or, dans ce cas, le fil, étant en communication constante avec la terre, représente une portion de sa surface. Si l'on suppose qu'il n'existe aucune masse électrique dans l'atmosphère, il s'établira dans le fil une distribution conforme aux lois de l'équilibre électrostatique. La densité à l'extrémité supérieure du fil croîtra avec la hauteur. Il arrivera un moment où la pression électrostatique vaincra la résistance de l'air. Une force électromotrice naîtra, un courant se produira dans l'air et se continuera dans le fil : courant d'autant plus intense que l'écoulement sera plus fort, c'est-à-dire que la densité et par suite la hauteur atteinte seront plus grandes. Le phénomène sera en tout semblable à celui que présente un paratonnerre installé sur un pic élevé et où apparaît l'aigrette connue sous le nom de feu Saint-Elme.

Si le fil s'approche de masses influentes ou les traverse, il se produira un changement de distribution ; la densité à la pointe variera et le courant résultant éprouvera les modifications corrélatives.

101. Mais, pour pouvoir interpréter les résultats ainsi obtenus, il y a lieu d'examiner de plus près le fonctionnement d'une pointe s'éloignant de la surface d'un conducteur chargé avec lequel elle reste en communication.

La densité à la pointe augmente proportionnellement à la distance du centre ou de la surface du conducteur puisque sur un ellipsoïde la densité à l'extrémité d'un axe est proportionnelle à la longueur de cet axe[1]. D'autre part, la pression électrostatique, sous l'action de laquelle l'écoulement se produit, est proportionnelle au carré de la densité à la pointe. Par conséquent, les déviations de l'aiguille du galvanomètre installé sur le circuit, qui sont proportionnelles au débit de la pointe

[1] Cette loi est théorique ; M. Mascart ne connaît pas d'expérience de vérification expérimentale (*Traité d'El. st.*, t. I, p. 119 et 125).

munie ou non d'un collecteur, augmenteront proportionellement au carré de la distance de cette pointe à la surface du conducteur.

102. Dans le cas donc, où la Terre pourrait être considérée comme un conducteur chargé et isolé dans l'espace ou même soumis à l'influence de masses lointaines, la série des déviations du galvanomètre, dans le procédé que je viens d'indiquer, serait représentée *par une parabole tournant sa convexité vers l'axe des abscisses sur lequel seraient portées les hauteurs correspondantes.*

Cette parabole serait représentée par une formule telle que :

$$D = \varkappa \varphi H^2 \qquad (1)$$

D étant la déviation correspondant à la hauteur H, $\varkappa$ étant une constante et φ l'intensité du champ supposé uniforme et constant.

Si maintenant l'on suppose que des masses électriques soient régulièrement distribuées dans l'atmosphère à partir du sol, le champ ne sera plus constant : φ variera avec la hauteur. Or, d'après le théorème de Poisson, on sait que, dans le cas de masses positives, $\frac{d\varphi}{dh}$ est négatif, φ diminue ; et qu'au contraire dans le cas de masses négatives, $\frac{d\varphi}{dh}$ est positif, φ augmente. Si l'on admet, par exemple, que φ soit une fonction linéaire de la hauteur, on aura, dans le premier cas : $\varphi = \frac{a}{H}$ et, dans le deuxième cas : $\varphi = bH$. La formule (1) deviendra alors, dans le premier cas :

$$D = \varkappa a H \qquad (2)$$

dans le deuxième cas :

$$D = \varkappa b H^3 \qquad (3)$$

La courbe des déviations galvanométriques sera donc : *une*

ligne droite dans le cas des masses positives et une parabole du troisième degré dans le cas des masses négatives. Pour toute autre fonction de relation de φ avec la hauteur H, la courbe de déviations se rapprochera de l'un de ces types réguliers, suivant la nature des masses répandues dans l'atmosphère. Toute irrégularité de distribution de ces masses introduira nécessairement des points d'inflexion ou des points singuliers. Mais il sera en général difficile de déduire φ de l'analyse de ces courbes.

Expériences.

103. J'examinerai maintenant les observations qui ont été faites jusqu'ici par les procédés dont je viens de donner une discussion générale.

Dans les expériences anciennes faites par le procédé du cerf-volant de Franklin, par de Romas, Kinnersley, Beccaria, Cavallo, Musschenbroek, Bertholon et autres, on appréciait l'intensité de l'électricité par l'intensité des étincelles que l'on provoquait à l'extrémité inférieure du fil ou par la divergence des boules de Canton suspendues à ce fil. Le résultat général de ces expériences est, comme je l'ai dit, que par temps serein les signes électriques sont d'autant plus forts que le cerf-volant est plus élevé. Mais aucune loi d'accroissement ne peut résulter d'observations aussi imparfaites. Je noterai seulement ce que dit de Romas : « pour exciter des étincelles aussi fortes qu'il était possible, il fallait attendre quelques instants comme pour donner le temps au cerf-volant de s'électriser ; 2° il y avait quelquefois en l'air de petits nuages blancs, clair-semés qui, s'approchant du cerf-volant, semblaient affaiblir son électricité ; 3° le vent ne soufflant pas uniformément, le feu électrique augmentait lorsqu'une forte bouffée enlevait bien haut le cerf-volant, et il diminuait beaucoup lorsque le vent qui relâchait le laissait baisser ; 4° si la forte impulsion de la bouffée qui enlevait plus haut le cerf-volant se rencontrait dans le

temps où ce châssis était dégagé des nuages, c'était alors que la plus belle électricité se manifestait, et c'était la plus faible au contraire, s'il en était autrement[1]. »

Les mêmes remarques ont été faites maintes fois depuis lors dans les mêmes conditions.

104. Les premières expériences dans lesquelles on ait noté quelque circonstance relative à la vitesse de l'accroissement avec la hauteur sont dues à Peltier. Ce physicien lançait un cerf-volant attaché à un fil de rosette de 400 mètres de long ; le tambour autour duquel le fil était enroulé avait un compteur. Tout l'appareil pouvait être isolé au besoin. Un multiplicateur de 3000 tours communiquait au fil du tambour par une de ses extrémités, et au sol par l'autre. Un électroscope pouvait à chaque instant contrôler les indications du multiplicateur. Une mire indiquait l'angle et le fil donnait l'hypoténuse.

Peltier fit par ce moyen, dans une plaine élevée à trois lieues de Corbeil, une série d'expériences par des temps d'une sérénité parfaite. Il observa que l'électromètre indiquait une électricité positive croissante à partir de 2 mètres au-dessus du sol jusqu'à 30 ou 40 mètres ; ce n'est qu'à cette hauteur que la quantité d'électricité devenait suffisante pour agir sur l'aiguille du multiplicateur. De 40 à 100 mètres, l'aiguille montait faiblement ; mais à partir de cette hauteur, elle marchait rapidement et le cerf-volant étant monté une fois jusqu'à 247 mètres, l'aiguille alla frapper l'arrêt à 90 degrés et se maintint entre 70 et 80, de sorte que le courant avait au moins une force de 600 degrés proportionnels à l'électromètre.

Peltier conclut de là que, « pendant ces jours secs et sereins, l'électricité positive croissait lentement jusqu'à 100 mètres, puis augmentait rapidement jusqu'au maximum de hauteur atteinte ». Il nota d'ailleurs que l'aiguille n'était pas tranquille dans sa déviation ; elle variait beaucoup suivant les changements et l'intensité du vent. « C'est, dit-il, principale-

[1] *Mémoires des savants étrangers*, t. II, 1755.

ment lorsque l'agitation fait donner des coups de tête au cerf-volant, que les variations de l'aiguille sont le plus étendues; l'aiguille parcourant souvent dans ce moment un arc de 10 à 25 degrés correspondant de 30 à 80 degrés proportionnels[1]. »

On voit, d'après ce que dit Peltier, que la courbe de déviations qu'il obtint avait une allure parabolique. Mais cette courbe n'est pas assez précisément déterminée pour qu'on en puisse conclure plutôt à un champ constant qu'à un champ croissant, produit par la présence des masses négatives dans la portion d'atmosphère explorée.

Au cours d'une de ses expériences, Peltier observa un renversement de signe à une certaine hauteur. On ne peut supposer un double renversement du magnétisme de l'aiguille, car le phénomène fut graduel et observé d'ailleurs à l'électroscope. L'observation paraît donc présenter assez d'intérêt pour être citée : « Le 21 avril 1840, le ciel était assez beau ; cependant des vapeurs formant de longs cirri liaient quelques strati éloignés et s'avançaient lentement dans l'espace. L'air donnait de faibles signes électriques à 3 mètres du sol ; le vent inférieur était NW, tandis qu'à la hauteur des nues il était S. Le cerf-volant lancé vers midi était arrivé à une hauteur de 30 mètres que le multiplicateur n'avait encore donné aucun signe de courant, tandis que l'électroscope avait indiqué une tension positive et croissante. De 30 à 50 mètres le multiplicateur dévia de 2 à 3 degrés et indiqua un courant positif descendant. Au-dessus de cette hauteur, le multiplicateur et l'électroscope indiquèrent une zone neutre, puis nous eûmes un courant négatif descendant de 2 à 3 degrés. L'électroscope donna à cette zone négative une épaisseur d'environ 20 mètres au-dessus de laquelle nous retrouvâmes l'atmosphère positive. Le nouveau courant positif fut faible d'abord, mais le cerf-volant étant monté à 120 mètres, l'aiguille commença à marcher rapidement; lorsqu'il

[1] *C. R.*, t. X, 1er semestre, 1840, p. 712 et suiv.

fut arrivé à 180 mètres, le courant donna 60 degrés, correspondant à 160 degrés proportionnels[1]. »

Duprez[2] rapporte que Peltier observa d'autres fois le même fait de renversement de signe, lorsqu'à la suite de jours chauds quelques légers nuages venaient à se former.

Le fait observé par Peltier peut s'expliquer par la présence d'une couche de masses négatives à environ 70 mètres de hauteur. (La distribution du potentiel et de la force électrique le long de la verticale répond en effet assez bien au cas de la planche III du traité élémentaire d'électricité de Maxwell [3]).

Les observations simultanées en des points d'altitudes différentes présentent parfois des résultats qui conduisent à une conclusion analogue.

105. Depuis Peltier, les cerfs-volants ont été quelquefois employés en météorologie pour l'exploration de l'atmosphère, mais je ne trouve aucune mesure électrique, faite par ce procédé, avant les expériences de L. Weber exécutées à Breslau en 1888[4].

Le professeur Léonhard Weber employa la méthode galvanométrique. Il s'assura d'abord, au moyen d'une tige de 1 à 2 mètres, que le courant de haut en bas qui prend naissance, sous l'influence de l'électricité atmosphérique, est d'une intensité extrêmement faible et de l'ordre de grandeur d'un micromilliampère environ, c'est-à-dire, la mille millionième partie d'un ampère. Il trouva que l'intensité du courant augmente cependant si la tige est plus longue ou terminée par une flamme à sa pointe.

L. Weber fit alors des expériences au moyen de cerfs-volants et de ballons captifs dont les câbles étaient rendus conducteurs. Pour obtenir une charge plus forte, il couvrait les bords du

[1] *C. R*, t. X, p. 712.

[2] Duprez, *Mémoires des savants étrangers*, t. XVI, ch. II, 1843.

[3] Voy. *Traduction française de* G. Richard, p. 98, 1884.

[4] Ces expériences sont décrites dans le journal *Humboldt* d'Otto Dammer de Berlin, 9e année, 1890, septembre, p. 292 et suiv.

cerf-volant de papier d'argent et attachait à la queue des morceaux de ce papier. On pouvait tirer ainsi des étincelles du câble quand le cerf-volant n'était encore qu'à une hauteur de 100 à 150 mètres. L'intensité du courant qui passait dans le galvanomètre (dont une borne était reliée à la terre) était au maximum de 20 micromilliampères.

Il fut d'abord évident qu'au point de vue quantitatif la signification théorique des mesures faites par ce procédé était soumise à de très grandes difficultés provenant du fait que la dispersion électrique a lieu non seulement par le cerf-volant, mais aussi par le câble. Pour obvier à cet inconvénient, M. Weber trouva avantageux de prendre pour câble un fil fin d'acier (du poids de 3 grammes par mètre), ne communiquant au cerf-volant que par l'intermédiaire d'un câble non conducteur de 4 ou 5 mètres de longueur. La longueur du fil d'acier déroulé d'un treuil et son inclinaison permettaient de déterminer la hauteur du cerf-volant.

106. M. Weber considère que, « un fil métallique étant tendu verticalement dans l'atmosphère et isolé à son extrémité inférieure, il y a dans la moitié inférieure fuite d'électricité positive et dans la moitié supérieure, absorption équivalente d'électricité positive ou écoulement négatif, de sorte que le potentiel du fil est à peu près égal au potentiel V de l'air au point correspondant au milieu du fil ou à sa demi-hauteur $\frac{h}{2}$. Dans ces conditions, si l'on mesure les distances explosives maxima des étincelles recueillies à l'extrémité inférieure du fil en en approchant un fil de terre, ces distances correspondront dans chaque cas au potentiel atmosphérique à la hauteur $\frac{h}{2}$ au-dessus du sol. »

M. Weber établit la relation entre le potentiel V du fil et l'intensité I du courant qui le parcourt en déterminant précisément le rapport entre le potentiel mesuré par les distances explosives maxima et l'intensité du courant mesuré à un galva-

nomètre reliant le fil à la terre. Ce rapport donné par un grand nombre de mesures faites avec différentes longueurs du même fil et avec le même galvanomètre, détermine une constante a qui représente, pour M. Weber, la résistance réciproque au passage du courant entre l'air et le fil pour 1 mètre de ce fil.

Au moyen de cette constante a, M. Weber établit la formule

$$\frac{dI}{dh} = \frac{1}{\sin\varphi} aV,$$

qui donne le potentiel V à la hauteur h de l'extrémité du fil dont l'inclinaison à l'horizontale est φ, quand on mesure l'intensité I en ampères sur le galvanomètre [1].

107. Des expériences furent faites dans l'été de l'année 1888, au nord de la ville de Breslau, pendant une période de douze jours sans nuages. Quand le temps était calme, on remplaçait le cerf-volant par un ballon captif. On put ainsi atteindre une hauteur de 450 mètres.

En prenant comme ordonnées les intensités du courant et, comme abscisses, les hauteurs correspondantes atteintes par le cerf-volant ou le ballon captif, la courbe des intensités présente sa convexité à l'axe des abscisses.

D'après ce que j'ai dit plus haut, il est difficile de déduire de cette courbe la loi de l'accroissement réel du potentiel avec la hauteur, car la signification des mesures est déduite par M. Weber de considérations qui reposent sur l'hypothèse d'un champ uniforme.

108. En effet, admettre que le potentiel d'un fil isolé et tendu verticalement dans le champ de l'atmosphère est constamment celui de la surface de niveau qui passe en son milieu, c'est

[1] M. Weber se servait d'un galvanomètre apériodique à échelle et lunette donnant, pour une distance de 1 mètre entre le miroir et l'échelle, une déviation de 1 centimètre pour 355×10^{-9} amp. *(Elektrotechnische Zeitschr.*, Band VIII, 1886, nov.; Bd IX, 1888, avril; Bd X, 1889, Aug. Nov. Dec.; 1892, p. 239-243).

admettre que ce champ ne dépend pas de masses répandues en proportion variable dans l'épaisseur d'atmosphère correspondante; car, dans ce cas, la ligne neutre serait variable le long du fil et les potentiels successifs mesurés ne correspondraient pas aux demi-hauteurs successives de l'extrémité du fil.

En admettant même que le coefficient a de Weber soit une constante, la position du point neutre devrait être déterminée à chaque instant pour qu'on en pût déduire la distribution (que l'on cherche) des masses influentes dont elle dépend.

Au surplus, on trouve dans les observations mêmes de Weber une preuve accidentelle des changements de distribution qui peuvent s'opérer le long du fil et des incertitudes qui en sont la conséquence.

Le professeur Weber signale en effet qu'au cours de ses expériences et pendant quelques jours seulement, il obtint un courant négatif.

Quoi qu'il en soit, les expériences de M. L. Weber ne déterminent pas la valeur du champ à diverses hauteurs ni, par suite, l'état électrique normal de l'atmosphère.

109. Des expériences au moyen de cerfs-volants ont été encore entreprises à l'Observatoire de Blue Hill (Readville, Mass. E.-U.) en juin 1891, par M. A. McAdie[1], dans le but de déterminer les valeurs de la chute de potentiel par mètre d'élévation à différentes hauteurs. Mais, pour diverses raisons, il ne put obtenir que quelques grossières mesures dont les principaux résultats furent :

1° Qu'à chaque chute du cerf-volant, il y avait un affaiblissement correspondant de potentiel;

2° Qu'il était possible d'obtenir des étincelles par un ciel parfaitement serein, et en général à une hauteur n'excédant pas 500 mètres.

Les variations de potentiel étaient suivies au moyen d'un

[1] *Annals of the Astron. Observatory of Harvard College*, vol. XL, Appendix A, p. 57.

électromètre à quadrants multiples à enregistrement mécanique [1].

M. McAdie perfectionna le procédé en élevant, au moyen de la corde du cerf-volant, un petit collecteur à écoulement d'eau. Il réussit à enregistrer ainsi pendant quelques heures les variations du potentiel à 100 mètres de hauteur libre.

110. En définitive, quel que soit le dispositif employé, le premier mode d'observation ne peut fournir des résultats susceptibles d'être interprétés que lorsque son emploi est limité aux faibles hauteurs en faisant usage d'électromètres bien gradués, sur une échelle très étendue.

C'est ainsi que M. Exner [2] étudia la marche de la chute de potentiel près de la surface de la terre, en se servant de petits ballons remplis d'hydrogène, munis d'une mèche et pourvus d'un fil fin de cuivre. Ce dernier était relié par son extrémité inférieure à l'électroscope à feuilles d'aluminium gradué. Pour des hauteurs ne dépassant pas 50 mètres par temps serein et calme, au-dessus d'une plaine très découverte comme au-dessus du sommet d'une montagne, M. Exner à trouvé que *la chute de potentiel normale est linéaire, conformément aux lois de l'équilibre électrostatique* si l'on considère la terre comme un conducteur chargé.

[1] L'*électomètre à quadrants multiples* dont M. McAdie fait usage depuis 1891, et qu'il a sans doute perfectionné depuis, est essentiellement un électromètre à quadrants agrandi, comprenant 80 grands quadrants et une aiguille à 20 lames parallèles suspendue par un fil de platine très fin. On a ménagé un accès facile des différentes parties et l'isolement obtenu est, paraît-il, meilleur que dans les petits instruments ordinaires. La pile de charge est composée de 100 éléments Volta (Cu, Zn, eau pure).

L'enregistrement mécanique est obtenu au moyen d'une plume Richard montée sur un index très léger en aluminium.

Le tracé se fait sur une feuille de papier appliquée sur un plan de verre qui se déplace, au moyen d'un mouvement d'horlogerie, à raison de 1 centimètre par 15 minutes.

Voy. *Annals of the Observatory of Harvard College — Observations of the Blue Hill meteorological Observatory*, 1892; Appendix C, p. 120.

[2] F. Exner, Ueber die Ursache und die Gesetze der atmosphärischen Electricität *(Sitzungsberichte*, t. XCIII, p. 260, Wien, 1886).

En admettant ce résultat, qui est une moyenne, il est utile de considérer les écarts individuels des observations pour se rendre compte de l'approximation qu'on peut atteindre par ce procédé. Ainsi, les tableaux suivants donnent la lecture en volts de l'électromètre et la hauteur correspondante de la mèche au-dessus du sol, respectivement dans la plaine et sur la montagne :

Hauteur en mètres.												
17m	18	20	21	22	24	25	27	30	34	36	40	46	48
Potentiel V (lectures).													
100v	110	120-140	130	160	160	170	190	195-210	250	240	280	320	350

Hauteur en mètres.										
3m	5	6	7	12	14	18	19	20	22	25	30
Potentiel V (lectures).											
110v	140-150	210	230-250	380-405	480	520-550	550	660	660	820	970

Si l'on forme les différences entre les valeurs successives du potentiel, on obtient pour les valeurs successives de la chute $\frac{\text{volt.}}{\text{mèt.}}$ des valeurs notablement différentes. Mais les écarts ne suivent aucune loi définie et présentent le caractère des erreurs accidentelles, ce qui autorise à considérer $\frac{dV}{dn}$ comme constant et égal à la moyenne : 68 $\frac{\text{volt.}}{\text{mèt.}}$ pour la plaine, 318 $\frac{\text{volt.}}{\text{mèt.}}$ pour la montagne (1870 mètres de hauteur, sur le bord du Wolfgangsee).

111. Aux observations précédentes se rattachent, par le procédé employé, les observations de l'expédition polaire finlandaise à Sodankyla et à Kultala (Laponie finlandaise) de 1882 à 1884[1].

Ces expériences ont été entreprises dans le but de révéler

[1] Voir la description complète des expériences dans le tome III des *Explorations internationales des régions polaires*, et le résumé dans le *Traité sur l'aurore boréale*, de Lemström, Gauthier-Villars, 1886, ch. XI.

l'existence dans l'atmosphère de mouvements de masses électriques, c'est-à-dire de courants électriques, auxquels parraissent dus, dans l'air raréfié des hautes régions, les phénomènes de l'aurore boréale : ces courants devant être sensibles, même dans l'air à la pression ordinaire. Dans cette électrodynamique de l'atmosphère, l'air est regardé comme un milieu non absolument isolant, de conductibilité d'ailleurs variable; à travers lequel il se produit, dans certaines conditions de tension et de conductibilité, des décharges lentes entre un certain conducteur atmosphérique chargé positivement et la terre chargée négativement.

Sans examiner par ailleurs ce que cette supposition peut avoir de fondé, je remarquerai que les expériences peuvent être interprétées simplement au point de vue statique comme les observations de Peltier et de Weber.

On s'est servi, en effet, comme dans ces dernières, de conducteurs à pointes, isolés et reliés à des galvanomètres en communication avec le sol par la seconde extrémité de leurs circuits. Mais le dispositif le plus intéressant a consisté à isoler le galvanomètre et à relier ses deux bornes à deux appareils d'écoulement à pointes, maintenus isolés à des hauteurs différentes. En supposant, comme c'était le cas, que les deux collecteurs fussent identiques, on obtenait une déviation proportionnelle à la différence de potentiel entre deux points de l'air distants d'une quantité déterminée.

L'appareil à écoulement se composait d'un fil de fer de $0^{m}002$ de diamètre, portant des pointes soudées à $0^{m}50$ les unes des autres. Le fil formait des spires en carreau, où chaque tour se trouvait à la distance de $1^{m}50$ du suivant; et le tout était supporté, avec les pointes en l'air, par des poteaux de $2^{m}50$ de hauteur, munis d'isolateurs Mascart. Le fil à pointes occupait une surface de 364 mètres carrés.

Les résultats obtenus à Kultala ont été formulés par M. Lemstrôm, de la façon suivante :

« 1° Si deux appareils d'écoulement à peu près semblables et

placés à la *même hauteur* sont réunis au galvanomètre, ils ne donnent aucun courant, c'est-à-dire que la déviation du galvanomètre est égale à 0.

« 2° Un appareil situé à 334 mètres d'altitude, étant réuni par le galvanomètre à un appareil situé à 324 mètres, donnait toujours un courant *positif* de l'atmosphère vers la terre : la force de ce courant variait considérablement entre $0^{v},0326$ et $0^{v},0033$ par mètre.

« 3° Des appareils situés à 246 et 253 mètres donnaient, combinés avec les premiers (334 et 324 mètres), un courant *négatif*, c'est-à-dire de bas en haut : ce qui signifie, d'après M. Lemstrôm, que tout près de la terre se trouve une couche d'air où l'électricité positive a une plus grande densité que dans la couche située immédiatement au-dessus d'elle ; de sorte qu'à partir de la surface de la terre la densité va en diminuant jusqu'à un minimum et elle s'accroît ensuite de nouveau. »

D'après la description donnée, tous les appareils étaient installés au voisinage de la surface du sol, les uns au sommet, les autres au pied ou sur le versant d'une colline, et la signification, au point de vue électrostatique, est difficile à assigner. Cependant, pour étudier avec plus de soin cette dernière singularité des phénomènes près de la surface, on fit des expériences avec deux appareils d'écoulement transportables : l'un S′ à 334 mètres d'altitude et à 2 mètres au-dessus du sol, l'autre S″ à la même altitude, mais à l'extrémité d'un mât de $9^{m}10$ de hauteur.

Avec ces appareils opposés sur le galvanomètre, on obtint un courant *négatif*, c'est-à-dire de *bas en haut*.

S″ descendu à la même hauteur que S′, la *déviation fut nulle;*

S″ remonté à 9 mètres, la déviation fut *négative comme précédemment;*

S′ attaché à deux poteaux de 3 mètres, munis d'isolateurs et élevés par deux hommes à une hauteur de 4 mètres, la *déviation devint positive.*

Cette expérience prouve, d'après Lesmtröm, que la densité électrique de cette couche d'air diminuait jusqu'au moment où le courant changeait de signe et que le minimum devait se trouver entre 2 et 4 mètres de hauteur. En résumé, Lemström conclut que : « *A partir d'une couche d'air qui se trouve à quelques mètres au-dessus de la terre, la force électromotrice croît avec la différence de hauteur entre les appareils d'écoulement*, et il est probable que *la force électromotrice croît plus vite qu'en raison directe de la différence de hauteur:* mais les lois de cet accroissement n'ont pu être déterminées.

Il faut ajouter qu'un appareil d'écoulement installé à $2^{m}50$ du sol et relié à la terre par l'intermédiaire d'un galvanomètre donnait généralement un courant *négatif*, c'est-à-dire de bas en haut.

112. Pour interpréter ces résultats, au point de vue électrostatique, traçons la courbe de variation du potentiel avec la hauteur, en remarquant que le sens du courant est celui des potentiels décroissants. On voit que $\frac{dV}{dn}$ est négatif entre le sol et 3 mètres de hauteur environ où il s'annule pour devenir positif et probablement croissant, d'après Lemström.

Cette variation signifierait que le sol est recouvert d'une couche d'air négative de 3 mètres d'épaisseur, à partir de laquelle l'influence positive supérieure devient de plus en plus prédominante à mesure qu'on s'élève, sans exclure complètement la présence de masses négatives dans l'atmosphère inférieure. De telle sorte que l'excès positif supérieur présente son équivalent négatif, non point sur le sol même, mais dans la couche d'air qui repose sur le sol.

Tout se passerait donc comme si la surface de la terre, dans les régions polaires, abandonnait à la couche d'air à son contact la charge négative qui y est développée par l'influence des couches supérieures ou qui y est amenée par le fait de la distribution de la charge induite ou développée en d'autres lieux du globe conducteur.

Pour l'explication de ce phénomène, il y a sans doute lieu de tenir compte de ce fait annoncé par *Edlund*[1] : à savoir que « toutes circonstances égales d'ailleurs, la résistance électrique de l'air est moindre dans les régions polaires que dans les régions équatoriales ; cette résistance diminue avec l'accroissement de l'inclinaison magnétique de la terre, c'est-à-dire avec la composante verticale de l'induction unipolaire (force normale à l'inclinaison).

M. Edlund a, du reste, appuyé ses conclusions sur les observations faites par Wijkander[2], dans l'expédition polaire de 1872-73, à Polhem, par 80 degrés de latitude N., d'après lesquelles le potentiel en un point du voisinage du sol était, à cette latitude, généralement très faible et aussi fréquemment négatif que positif, même par un ciel parfaitement clair.

L'état habituellement négatif des couches d'air voisines du sol expliquerait l'affaiblissement et le fréquent changement de signe du champ sur le sol des régions polaires, mais il n'exclut point nécessairement l'existence d'un champ électrique plus ou moins intense dans les régions moyennes et supérieures de l'atmosphère. Les mesures manquent à cet égard et l'état électrique de l'atmosphère, dans les régions polaires, n'est pas déterminé.

On sait cependant que le changement de signe du champ sur le sol correspond généralement à l'apparition des phénomènes auroraux. C'est ce qu'établissent les observations de M. S.-A. Andrée au cap Thordsen (Spitzberg), celles de M. Paulsen à Godthaab[3] (côte ouest du Groënland). Les obser-

[1] Edlund, Recherches sur l'induction unipolaire, l'électricité atmosphérique et l'aurore boréale *(Ann. de Chim. et de Phys.*, 5e série, t. XVI, p. 83 et 97, 1879).

[2] *Bulletin (Ofversigt) des travaux de l'Ac. des Sc. de Suède*, pr 1874 ; cité par Edlund *(loc. cit.)* et par S.-A. Andrée (obs. au cap Thordsen, Spitzberg, p. 9-10)

[3] Paulsen, La nature et l'origine de l'aurore boréale *(Ciel et Terre*, 16e année, p. 197, 1895), cite les obs. de M. Vedel et de M. S.-A. Andrée.

vations magnétiques de M. Vedel, membre de l'expédition danoise sur la côte orientale du Groënland, indiquent en outre que les bandes et les rideaux auroraux sont parcourus par des courants électriques dont la direction est de bas en haut. Lors de ces phénomènes, le potentiel électrique va donc en décroissant vers le haut. Pour que ce fait soit compatible avec l'accumulation de masses négatives observée au voisinage du sol, il faut admettre avec Paulsen que le rayonnement auroral est accompagné d'un écoulement de haut en bas et jusqu'au sol, de masses négatives. Et l'on doit considérer cet écoulement comme ayant pour effet de rétablir un état d'équilibre stable qu'un accès anormal de masses négatives dans les hautes régions troublerait dans les circonstances correspondantes aux apparitions aurorales.

La théorie de Paulsen, émise d'après ces considérations, est la plus plausible, mais elle ne repose encore que sur un trop petit nombre de faits d'observation et la question ne peut-être définitivement résolue que par l'exploration électrique de l'atmosphère au-dessus des couches basses perturbées des régions polaires.

Mode II.

113. Dans ce mode expérimental qui requiert nécessairement l'emploi d'un ballon captif, on peut reconnaître l'état électrique du fil à ses deux extrémités, supérieure et inférieure. Il a été employé pour la première fois par le professeur Eug. Semmola[1] et inspiré par la méthode du conducteur mobile de Palmieri.

Les premières observations ont été faites à Naples avec le ballon captif l'*Urania* de l'aéronaute Spelterini. On fixa sur la paroi extérieure de la nacelle, au moyen d'un robuste isolateur, une barre de laiton verticale d'un demi-mètre de

[1] *C. R.*, 1er semestre, 1892, t. CXIV, p. 354.

longueur, terminée au-dessus par un disque de laiton ayant un diamètre de 28 centimètres. Ce disque communiquait par un fil de cuivre, avec la feuille d'or d'un électroscope à piles sèches, placé dans la nacelle à peu près au même niveau. A la barre de laiton était soudé, en plusieurs points, le bout supérieur d'une corde de cuivre de 2 millimètres de diamètre recouverte d'une double enveloppe isolante : l'intérieure en caoutchouc, l'extérieure en coton. Cette corde, longue de 280 mètres, descendait du ballon, se posait en longs zigzags sur un plancher tout près du sol, et allait communiquer, par l'autre bout, avec un second électroscope à piles sèches. On préféra disposer ainsi la corde, plutôt que de l'enrouler autour d'un tambour, pour éviter les frottements.

114. Par une journée calme et sereine, le ballon s'éleva rapidement et parvint en deux minutes à la hauteur de 280 mètres où il fut arrêté. A terre, l'électroscope accusa de l'électricité positive, croissant de telle façon qu'elle devint très forte à la fin de la course (la feuille d'or battait incessamment le pôle négatif de la pile) : dans la nacelle l'électricité fut positive, mais très faible. On mit alors le bout inférieur de la corde de cuivre en communication avec le sol; l'électricité se montra aussitôt fortement négative dans la nacelle et nulle à terre. La communication au sol étant enlevée, la feuille d'or de l'électroscope inférieur commença à dévier violemment vers le pôle négatif et celle de l'électroscope supérieur commença à dévier légèrement vers le même pôle. Cette observation fut répétée plusieurs fois, toujours avec le même résultat.

Dans une autre ascension, le bout inférieur de la corde fut mis en communication avec un électromètre Palmieri. Pendant que le ballon s'élevait, l'électromètre eut une *déviation uniforme, qui crût régulièrement.* A la hauteur de 280 mètres, l'index marqua 50 degrés. Dès que fut mise la communication avec la terre, l'index revint à zéro. La communication étant supprimée, l'index dévia avec force d'un arc impulsif de plus de 70 degrés.

115. Palmieri[1], discutant ces observations, note que l'électricité croissant à l'extrémité inférieure du fil est évidemment induite et due au mouvement d'élévation de ce fil, comme le donnerait un conducteur mobile s'élevant de 280 mètres. Puis il remarque que, si après les dix premiers mètres de course on l'eût déchargé de l'électricité obtenue au bas et que cette opération eût été répétée pour chaque course de 10 mètres d'élévation; en mesurant les potentiels successifs, on aurait dû trouver des valeurs croissantes de ces potentiels, dans le cas d'augmentation avec les hauteurs, et l'inverse dans le cas des valeurs décroissantes. En d'autres termes — d'après l'interprétation, que j'ai donnée plus haut, de la pensée de Palmieri — cette manière d'opérer eût donné les chutes de potentiel $\frac{\text{volt.}}{10^{\text{m}}}$ successives, et c'est précisément le signe de l'accroissement de ces chutes de potentiel qui nous eût instruit sur l'état électrique de l'atmosphère.

Mais si la seule déviation finale observée correspond, comme le prétend Palmieri, à la différence de potentiel entre le sol et la hauteur de 280 mètres, on ne peut rien conclure quant à la variation de l'intensité du champ avec la hauteur. Tout au plus, pourrait-on déduire, d'après l'uniformité et la régularité remarquées dans l'accroissement de la déviation, que le champ est uniforme, et assigner à l'intensité $\frac{dV}{dn}$ de ce champ une valeur égale au quotient du potentiel final observé par la hauteur 280 mètres correspondante. A ce sujet, Palmieri est en contradiction avec lui-même lorsqu'il proteste en ces termes[2] : « Si ce que des hommes autorisés ont avancé en se basant sur des expériences mal interprétées, je le crains, était exact, chaque mètre devant faire gagner 100 volts, le professeur Semmola aurait dû trouver un potentiel de 28.000 volts;

[1] Palmieri, *Lumière électrique*, t. XLVII, p. 170, n° du 28 janvier 1893.
[2] Palmieri, *loc. cit.*, p. 171.

de sorte qu'il n'eût pu décharger impunément l'extrémité inférieure du fil en engendrant dans la nacelle 28.000 volts d'électricité négative. »

D'ailleurs, si le potentiel final du fil n'a pas atteint 28.000 volts, c'est que l'intensité moyenne du champ ne correspondait pas à une chute normale de potentiel de 100 volts par mètre ou bien, ce qui est plus probable, c'est que l'isolement était insuffisant. On ne peut pas prétendre, en effet, isoler des charges statiques de cet ordre avec « un fil entouré de caoutchouc et de coton et traînant sur un plancher posé sur le sol », ni même avec un « robuste isolateur » dont la substance n'est d'ailleurs pas indiquée.

Pour cette raison, les expériences de M. Semmola ne fournissent aucune valeur quantitative ni même qualitative du champ.

116. Cependant, d'après son auteur, cette méthode permettrait d'obtenir des observations simultanées en reconnaissant l'état électrique de la corde aux deux extrémités; mais il reste à déterminer la signification de ces mesures simultanées, ce que M. Semmola ne fait pas. En réalité, elles n'en ont aucune. En effet, les deux extrémités d'un fil métallique en équilibre électrostatique doivent toujours donner au même instant le même potentiel à deux électromètres; les indications seront équivalentes, à condition que les électrodes extérieures de ces électromètres soient au même potentiel : celui du sol, par exemple. Si donc, dans ses expériences, M. Semmola a obtenu à l'extrémité supérieure du fil une déviation positive beaucoup plus faible que celle de l'extrémité inférieure, cela prouve simplement que l'électrode extérieure ou le milieu de la pile sèche de l'électroscope de la nacelle était à un potentiel supérieur à celui du sol. La nacelle, sur laquelle était posé l'électroscope, était en effet en communication imparfaite avec le sol par l'intermédiaire du câble vraisemblablement fait d'une matière textile quelconque ne possédant qu'une faible conductibilité.

Pour la même raison, l'électroscope supérieur indiquait une déviation négative en même temps que l'électroscope inférieur marquait zéro, lorsque le fil était mis à la terre. Comme, d'ailleurs, le potentiel opposé à celui du fil, dans l'électroscope de la nacelle, est une fraction indéterminée du potentiel de la région correspondante de l'air, les observations simultanées faites au moyen de ce fil n'ont aucune signification relativement à la qualité du champ électrique de l'atmosphère.

117. Néanmoins, ce mode expérimental peut donner des résultats très significatifs si l'on prend, comme la fait Holmgren[1], une sphère de laiton de capacité relative déterminée et que l'on mesure les quantités d'électricité développées sur cette sphère mise en communication avec la terre à différentes hauteurs au-dessus du sol.

Holmgren démontrait en effet que, si c'est l'atmosphère qui contient l'agent et qu'on la considère comme une sphère électrique creuse avec une densité constante dans chaque couche concentrique, la quantité d'électricité sur la sphère de laiton augmente comme le cube de la hauteur, mais que cette quantité augmente directement comme la hauteur si l'agent est répandu sur la surface du globe terrestre.

Holmgren a fait, aux environs de Lund, des séries de mesures qui satisfont, paraît-il, à l'expression $m = a\,\mathrm{H} + b$ (a et b étant des constantes); d'où ce physicien concluait qu'un « agent étendu sur la surface de la terre détermine les phénomènes électriques qui se produisent dans le voisinage de cette surface ». Mais je ne connais pas le dispositif expérimental employé par Holmgren et je crois qu'il y a lieu de faire, au sujet d'une conclusion d'une aussi haute portée, les mêmes réserves que Hamberg a cru devoir formuler dans son intéressant mémoire[2] auquel j'emprunte ces résultats:

[1] Holmgrem, Om elektriciteten som kosmik (Kraft *Kongl. svenska vetenskaps-akademiens handlingar*, Bd. VIII, n° 10, et Bd. IX, n° 15).

[2] Hamberg, *loc. cit.*, p. 92.

ceux-ci doivent être confirmés par de nombreuses expériences faites en différents points du globe.

118. J'ajoute que le choix de la méthode et des conditions expérimentales est de la première importance et, d'ailleurs, pour les raisons que j'ai exposées, le ballon libre qui permet de s'élever assez haut pour se soustraire aux perturbations dues au voisinage du sol semble offrir le moyen le plus sûr pour ce genre de recherches ; c'est du moins le seul qui nous puisse renseigner sur l'état électrique des hautes régions de l'atmosphère libre.

Mode III.

119. Ce mode expérimental comprend toutes les méthodes dans lesquelles on ne mesure que des différences de potentiel indépendamment du potentiel du sol. Il se rapporte donc en général, aux observations faites en ballon libre.

120. Les premières observations en ballon libre ont été faites par Biot et Gay-Lussac[1], dans leur mémorable ascension du 10 fructidor an XII. Ces physiciens se proposaient d'observer « la différence d'électricité des différentes couches atmosphériques ». Ils avaient emporté pour cela des fils métalliques de diverses longueurs, depuis 20 jusqu'à 100 mètres. « En suspendant ces fils à côté de notre nacelle, à l'extrémité d'une tige de verre, ils devaient nous mettre, dit Biot, en communication avec les couches inférieures et nous permettre de puiser leur électricité. Quant à la nature de cette électricité, nous avions, pour la déterminer, un petit électrophore chargé très faiblement, dont la résine avait été frottée à terre avant le départ. » L'extrémité supérieure du fil était reliée à un électroscope posé sur la nacelle ou tenu à la main ; mais je ne connais pas le détail des observations. Tout ce que l'on

[1] Biot et Gay-Lussac, *Journal de Physique*, t. LIX, p. 315, 1804.

sait, c'est que l'électricité fut trouvée « résineuse et croissante avec les hauteurs ».

121. La déviation négative de l'électroscope prouve évidemment que le potentiel du fil était inférieur au potentiel des couches d'air voisines de son extrémité supérieure, c'est-à-dire inférieur au potentiel de la cage de l'électroscope posé sur la nacelle de l'aérostat. Cette déviation correspondait à cette différence de potentiel : par conséquent, cette différence croissait avec la hauteur.

Si cet accroissement de la différence ne pouvait pas provenir de modifications survenues accidentellement dans l'état électrique relatif de l'aérostat lui-même, il faudrait en conclure que les surfaces de niveau se resserraient de plus en plus à mesure qu'on s'élevait, c'est-à-dire que la chute normale de potentiel $\frac{dV}{dn}$ augmentait et, par suite, il y avait des masses électriques négatives distribuées dans la portion d'atmosphère parcourue par le ballon.

122. Biot interprétait le résultat de ses expériences dans l'hypothèse de couches de plus en plus électrisées : les couches supérieures, plus fortement chargées d'électricité positive, exerçant sur le fil métallique une action par influence plus puissante que celle produite par l'électricité des couches inférieures. Duprez se rangeait à cette opinion.

123. Mais on doit remarquer que, dans cette méthode, les résultats proviennent de la comparaison des états électriques de deux corps dont l'un, le fil, est en équilibre électrique avec un point indéterminé et variable de l'air, et dont l'autre, l'aérostat portant la cage de l'électroscope, est en outre très mal défini au point de vue électrique. Un aérostat est en effet constitué de telle sorte que sa surface, quoique considérable par rapport à celle du fil, est cependant d'une conductibilité imparfaite et variable. Elle acquiert de ce fait, sous l'influence du champ atmosphérique, une distribution assez irrégulière et soumise en outre aux modifications provenant des pertes subies

par les jets de sable. Enfin, les deux états électriques ne se modifient pas simultanément sous la seule et même influence atmosphérique. Ce dispositif expérimental n'est donc pas propre à l'étude de cette influence.

124. De Saussure[1], en 1785, avait indiqué un plan d'expériences qui mettait à l'abri de cette cause d'erreur en permettant la comparaison des états électriques de deux conducteurs à pointes métalliques analogues, indépendamment de l'état électrique du ballon. C'est sur ce plan modifié avec les ressources nouvelles, qu'ont été faites les expériences les plus significatives de ces dernières années. Mais avant de rendre compte de celles-ci, je crois qu'il est intéressant et juste de reproduire ici, tout au long, ce projet oublié que de Saussure proposait, deux ans après l'invention de Montgolfier, « aux physiciens qui auraient l'occasion de s'élever en l'air dans une machine aérostatique ».

« Je voudrais, dit-il, que l'on fixât au ballon deux conducteurs égaux de 8 à 10 pieds de longueur, terminés en pointe et aussi légers que possible ; l'un aurait sa pointe tournée en bas du côté de la terre, l'autre en haut, du côté du ciel ; ils seraient isolés l'un et l'autre, et ne communiqueraient entre eux que quand on le voudrait. Celui d'en haut devrait être coudé pour pouvoir s'élever sans toucher, et même sans approcher de trop près le corps du ballon. Ces deux conducteurs et un électromètre quelconque, pourvu qu'il fût sensible, formeraient tout l'appareil.

« Je suppose à présent que le ballon, muni de cet appareil, pût demeurer suspendu en l'air à 40 ou 50 toises (80 à 100 mètres) de la terre, pendant un espace de temps assez long pour que le fluide électrique qu'il contiendrait se mît à l'unisson de la partie de l'atmosphère qui lui serait contiguë ; alors le conducteur inférieur paraîtrait électrique en moins, relativement au corps du ballon, tandis que le conducteur supérieur paraîtrait

[1] De Saussure, *Voyage dans les Alpes*, t. II, § 834.

électrique en plus, relativement à ce même ballon. A cette hauteur, le résultat de l'expérience ne me paraît nullement douteux. Mais en serait-il de même à toutes les hauteurs? Voilà ce que nous ignorons absolument. Pour le savoir, il faudrait s'élever successivement à différentes hauteurs, s'arrêter pendant quelque temps à chacune d'elles, y faire l'expérience; puis détruire l'électricité de l'un et de l'autre conducteur en les faisant communiquer ensemble, monter alors à une hauteur plus grande, séparer les conducteurs, attendre quelque temps, et les observer de nouveau. En répétant ainsi cette expérience, peut-être trouverait-on le fluide électrique continuellement plus dense dans les régions supérieures, peut-être même parviendrait-on à déterminer la loi de sa condensation. Peut-être aussi, et cela me paraît même actuellement vraisemblable, arriverait-on enfin à une hauteur où l'électricité paraîtrait la même ou nulle dans les deux conducteurs, et où par conséquent la densité du fluide électrique serait sensiblement la même dans les couches supérieures et inférieures. »

125. « Ces expériences soigneusement liées avec celles, tant du thermomètre que de l'hygromètre et du baromètre qui donnerait les hauteurs, seraient certainement très curieuses et très instructives; mais il faudrait que la navigation aérienne fût assez perfectionnée pour que l'on pût se maintenir au moins pendant une heure à la même hauteur, et qu'on fût assez familiarisé avec ce genre de voyage pour faire toutes ces observations dans la gondole du ballon avec la même liberté d'esprit que dans son cabinet. Je n'ai pas besoin d'avertir qu'il faudrait bien vite abattre ces conducteurs à la moindre apparence d'orage, d'autant mieux que les observations ne seraient instructives que par un temps absolument serein, et même à à peu près calme. »

126. De Saussure ajoutait les remarques pratiques suivantes qui sont, au langage près, celles que l'on peut encore formuler dans l'état actuel de la pratique aéronautique :

« Il faut observer , disait-il, que si, en faisant cette expé-

rience, on ne pouvait pas séjourner dans une station assez longtemps pour que le corps du ballon et de l'observateur se missent en équilibre avec le fluide électrique de l'air ambiant, ils continueraient à participer à l'état du fluide électrique dans la station inférieure ; et lorsque le fluide électrique serait plus dense dans la station la plus haute, les deux conducteurs paraîtraient l'un et l'autre électrisés en plus ; mais l'électricité paraîtrait plus forte dans le conducteur d'en haut que dans celui d'en bas, et leur différence donnerait également l'état relatif du fluide électrique dans les différentes couches. Si, par exemple, le ballon armé de ses conducteurs s'élevait tout à coup de la surface de la terre à la hauteur de 100 toises (195 mètres) et qu'au moment de son arrivée à cette hauteur, on fît la comparaison de l'électricité dans les deux conducteurs, il est bien évident que le corps du ballon parfaitement isolé dans l'air n'aurait point eu encore le temps d'être pénétré par le fluide électrique, plus dense à cette hauteur qu'à la surface de de la terre, parce que l'air ne peut s'en dessaisir pour le communiquer au ballon que lentement et de proche en proche ; l'électromètre, à l'unisson du corps du ballon et de l'observateur, serait donc encore à très peu près à l'unisson de la terre. Cependant, les conducteurs à cause de leur forme et de leur grande surface, se seraient déjà rapprochés du ton du fluide électrique dans l'air ambiant ; ils en contiendraient l'un et l'autre une plus grande quantité qu'auprès de la terre ; et, par conséquent, ils paraîtraient l'un et l'aure électriques en plus. L'expérience ne serait donc pas aussi frappante que si le ballon eût été exactement à l'unisson de l'air ambiant, puisque, dans ce cas, les deux conducteurs auraient paru électrisés en sens contraire, mais elle serait également instructive si l'on observait avec soin *la différence d'électricité dans les deux conducteurs*. Et cette méthode serait, à ce que je crois, la seule praticable, parce qu'il serait bien difficile pour ne pas dire impossible, de faire tenir le ballon à une hauteur déterminée assez longtemps pour qu'il se mît à l'unisson de l'air. »

127. Ce plan élaboré il y a plus d'un siècle fournit en même temps que la critique du procédé employé vingt ans plus tard par Biot et Gay-Lussac, l'indication détaillée des avantages et des difficultés du plan adopté en ces dernières années par M. F. Exner.

128. Le plan de M. F. Exner[1] en effet ne diffère, au fond, de celui de Saussure que par la substitution de collecteurs à écoulement d'eau aux pointes métalliques. Mais M. Exner a le mérite d'avoir, le premier, posé clairement la question à résoudre par les expériences en ballon à grandes hauteurs et dégagé les conséquences théoriques des résultats possibles. La question est celle-ci : la valeur de $\frac{dV}{dn}$ reste-t-elle constante à toute hauteur ?

« On aurait la réponse, dit M. Exner, si l'on munissait la nacelle du ballon de deux collecteurs à eau isolés et présentant entre eux une différence constante de 2 mètres par exemple. En joignant leurs conducteurs à des points convenables d'un électromètre à main ou, si l'on se sert d'un électroscope gradué, l'un des conducteurs avec les feuilles, l'autre avec l'enveloppe métallique extérieure isolée, on pourra mesurer la différence de potentiel correspondant à cette différence de niveau, et cela pour chaque hauteur. »

129. Je mentionnerai d'abord les expériences ainsi faites et leurs résultats ; j'en discuterai les conséquences à la suite de l'exposé de mes observations personnelles.

130. Les premières observations ont été faites, sur les indications de M. Exner, par M. Lecher, à Vienne, dans la soirée du 6 juin 1885, à bord de la nacelle du ballon *Vindobona*. On avait installé deux collecteurs à eau à 10 mètres au-dessous de la nacelle avec une différence de niveau de 2 mètres. Ces collecteurs étaient reliés par des fils fins à un électroscope gradué, fixé et isolé sur la nacelle. Le temps était clair et très

[1] F. Exner, *Sitzungsberichte*, Wien, t. XCIII, p. 266, 1886.

calme : il régnait ainsi depuis quelques jours et continua encore plusieurs jours.

Dans l'espace de dix minutes, on mesura la grandeur de la chute verticale de potentiel à 440, 550 et 660 mètres de hauteur. Il en résulta une valeur constante $\frac{dV}{dn} = 193 \frac{\text{volt.}}{\text{mèt.}}$ qu'on doit considérer comme une valeur moyenne correspondant à la hauteur moyenne de 550 mètres. Une mesure simultanée effectuée à la surface de la terre avait donné : $\frac{dV}{dn} = 92,2 \frac{\text{volt.}}{\text{mèt.}}$.

131. M. Exner n'attribua pas à cette observation isolée une grande valeur au point de vue quantitatif : la hauteur atteinte était trop faible ; le temps dont on disposait pour l'installation, trop court. Mais il fut évident pour lui que la chute de potentiel c'est-à-dire l'intensité du champ $\frac{dV}{dn}$ augmentait avec la hauteur et que, par suite, la portion d'atmosphère traversée contenait des masses négatives.

132. En 1892, il n'avait été fait par le procédé d'Exner, aucune autre mesure de la variation de l'intensité du champ électrique avec la hauteur, lorsque M. Ch. André[1], discutant les théories récentes sur l'origine et les lois de l'électricité atmosphérique, et jugeant les observations fondamentales insuffisantes, entreprit de déterminer, par de nouvelles mesures en ballon, la nature du champ électrique de l'atmosphère. C'est alors qu'il me fit l'honneur de m'associer à ses recherches.

133. Le plan d'Exner fut adopté. Mais afin d'éviter les incertitudes dans les lectures faites aux deux limites extrêmes de l'échelle de l'électroscope, on disposa les deux collecteurs d'eau de façon à pouvoir faire varier au besoin la différence de niveau de ceux-ci, pour maintenir à peu près constante la déviation des feuilles.

[1] Ch. André, *Relations des phénomènes météorologiques*, ch. VII, Lyon, 1892, et *Revue générale des Sciences*, 3e année, p. 568 et 605.

M. Em. Marchand, Directeur de l'Observatoire du Pic du Midi, alors météorologiste à l'Observatoire de Lyon, et moi, fûmes chargés d'essayer le dispositif expérimental dans des ascensions préliminaires faites dans le ballon captif l'*Obiou*, du 4e Génie à Grenoble. M. André s'était assuré le gracieux concours de M. le capitaine Zobel et de ses lieutenants pour mettre à notre disposition les ressources de leur matériel aérostatique.

134. L'échelle de soie qui portait les réservoirs d'eau à 10 mètres au-dessous de la nacelle était suspendue par une potence à 30 centimètres au dehors. Les fils de communication venant des réservoirs étaient isolés sur des bougies de paraffine et aboutissaient aux deux électrodes de l'électromètre isolé sur le bord de la nacelle.

135. Des essais faits le 20 et le 21 mai 1892, il résulta pour nous : 1° que, dans notre dispositif, le déplacement d'un collecteur n'était pas pratiquement possible ; 2° que le captif ne se prêtait que difficilement à ce genre d'expériences à cause du balancement de la nacelle qui amenait fréquemment les réservoirs ou leurs fils en contact avec le câble (du moins dans notre cas d'un petit ballon de 600 mètres cubes).

136. Néanmoins le 23 mai, le temps étant calme, le ciel uniformément couvert d'un strato-cumulus, nous essayâmes de faire quelques déterminations. M. Marchand, resté à terre, en un lieu assez découvert, notait à un électromètre portatif de Thomson une chute normale de 200 volts par mètre. Je m'élevai dans la nacelle de 20 en 20 mètres, jusqu'à la hauteur de 300 mètres, et notai, à toutes les stations, la déviation des feuilles. Mais je n'obtins que des décharges répétées et, à la vérité, en moyenne le même nombre dans le même temps, c'est-à-dire une différence de potentiel à peu près constante et supérieure à 150 volts. La distance verticale des deux écoulements étant de 90 centimètres, on peut admettre que le champ était constant et de 200 volts par mètre. Ce résultat approxi-

matif me fut confirmé par le fait suivant qui mérite d'être signalé :

Ayant, à la hauteur de 300 mètres, approché le doigt de la boîte de l'électromètre, j'en tirai une étincelle très fine et très piquante d'environ 1 centimètre de longueur, en même temps que les feuilles, très brusquement écartées, venaient se coller en se froissant contre l'intérieur de la boîte. Or, cette distance explosive correspond à une différence de potentiel de 50.000 volts entre le collecteur supérieur à 290 mètres et la nacelle en communication assez bonne avec le sol par le câble (dans lequel était toroné le fil du téléphone), soit, à partir du sol, une chute de potentiel d'environ 170 volts par mètre.

137. Cette expérience, qu'il eût pu être dangereux de répéter, au moment où le ballon, en s'élevant, rejetait du gaz par son appendice, montre non seulement les dangers de l'application de cette méthode dans ces conditions, mais aussi le peu de confiance qu'on peut accorder aux résultats à cause des pertes inévitables qui doivent se produire sous des potentiels aussi élevés.

138. Comme conclusion, il était évident que nous pouvions, avec quelques modifications de détail, entreprendre les expériences en ballon libre. Celles-ci furent préparées en conséquence à l'aide de la tour du réservoir des eaux de l'Observatoire. Le dispositif auquel on s'arrêta se composait de : un ensemble de deux réservoirs suspendus par leur partie supérieure dans un milieu isolant formé de soufre et de paraffine, et comportant de l'eau pour trois heures d'écoulement; un treuil sur lequel était enroulée une échelle de soie de 20 mètres de longueur dont les cordons étaient maintenus de 4 mètres en 4 mètres par des bambous; ceux-ci, ayant à chaque extrémité une partie creuse, étaient en outre destinés à porter des bougies de paraffine qui, à l'aide d'anneaux de cuivre convenables, servaient à guider et à isoler les fils conducteurs reliant les tubes d'écoulement des collecteurs à l'électromètre : l'échelle étant

enroulée sur le treuil et les collecteurs étant rattachés à son extrémité, on devait, dès le départ, dérouler le treuil (muni d'ailleurs d'un frein éprouvé et d'un chien d'arrêt), fixer successivement chacune des bougies à son bambou (numérotés tous deux) et faire passer dans les anneaux les fils conducteurs soudés par leur partie inférieure aux tubes d'écoulement et portés à leur partie supérieure sur de petites bobines de déroulement. Cette manœuvre souvent répétée à l'Observatoire nous était devenue familière.

139. M. André s'assura alors le concours d'un aéronaute lyonnais, M. Pompéien, qui mit à notre disposition son ballon allongé, l'*Espérance*, de 1500 mètres cubes avec lequel nous espérions nous élever à près de 3000 mètres.

Le 27 septembre 1892, au matin, le temps était beau avec un très léger vent des régions sud : le ciel avait été également serein les deux jours précédents. Nous installâmes donc nos appareils sur la nacelle dans laquelle nous prîmes place, M. André et moi, sous la conduite de M. Pompéien. Pendant le gonflement, le vent du sud avait déjà pris de la force, mais insuffisamment, semblait-il, pour compromettre l'ascension. Le « *lâchez tout* » eut donc lieu vers 12 h. 30.

Or, à peine avions-nous quitté la terre qu'une rafale précipitait la nacelle contre un arbre dans les branches duquel nous perdions les fils des collecteurs et quelques bougies isolantes. Cependant, le ballon s'étant élevé sur un jet de lest important, nous nous occupâmes hâtivement de remettre nos appareils en état pour pouvoir dérouler l'échelle et commencer les observations. Mais nous avions à peine achevé cette réparation, que le ballon, qui avait atteint son maximum de hauteur vers 2000 mètres, se mettait à descendre rapidement. Nous n'avions plus assez de lest pour enrayer cette chute, et le vent soufflait en tempête. Un quart d'heure plus tard, nous touchions violemment le sol au bout de notre corde d'ancre; mais celle-ci se rompait sous l'effort, et nous étions livrés sans merci à la furie de l'ouragan.

Notre voyage aboutit à une catastrophe dans laquelle mon maître, M. André, et notre imprévoyant aéronaute reçurent des blessures qui mirent leur vie en danger. Et nous n'avions pu faire aucune observation!

140. Le 15 septembre, c'est-à-dire quelques jours avant notre tentative, le Dr Josef Tuma, de l'Institut physico-chimique de Vienne, avait fait une ascension en cette ville par un temps très clair régnant depuis quelques jours et dont les résultats furent présentés le 17 novembre 1892[1].

Les mesures furent faites à l'aide de collecteurs à écoulement d'eau qui étaient suspendus par des ficelles de 15 et 17 mètres. Ces ficelles étaient bien isolées(?) à leur extrémité supérieure, au moyen de cire à cacheter, et aboutissaient à l'électromètre tenu isolé à la main pendant les observations. On remplissait les réservoirs en faisant couler l'eau le long des ficelles qui, ainsi mouillées, servaient de conducteurs à l'électroscope. M. Tuma, au cours de son voyage qui dura 5 heures, de 10 heures du matin à 3 heures du soir, obtint les valeurs contenues dans le tableau suivant :

Hauteur en mètres.	410m	500	750	820	1000	1120	1300	1900
Lecture (dist. collecteurs = 2 m.) +	80v	88	95	104	107	110	120	140
Chute de potentiel pour 1 mètre. .	40v	44	47	52	53	55	60	70

M. Tuma en conclut : 1° que la chute de potentiel est positive jusqu'aux plus grandes hauteurs atteintes, et 2° qu'elle croît avec la hauteur comme c'est le cas selon la théorie d'Exner.

141. D'après la direction générale du voyage, on sait que le vent soufflait des régions Sud. Les observations de température et d'humidité faites par le Dr Margules donnaient pour la tension de la vapeur d'eau : $13^{mm},8$ à 370 mètres et $12^{mm},6$ à 1000 mètres. Or, suivant la formule de Hann ($p_n = p_0 (1 - 0,246n + 0,0157n^2)$) la distribution normale de la vapeur d'eau eût donné une tension de $13^{mm},7$ dans le premier cas, et

[1] Dr Josef Tuma, *Sitzungsberichte*, Wien, Bd. CI, Heft X, p. 1556, 1892

de $11^{mm},9$ dans le second. « Il y avait donc ce jour-là, dit M. Tuma, *moins* de vapeur d'eau au-dessous de nous qu'il eût dû y en avoir normalement. »

En supposant avec Exner, que la densité électrique négative de la vapeur d'eau varie comme sa tension avec la hauteur, il s'en suivrait qu'il y avait moins d'électricité négative qu'il eût dû y en avoir, dans la couche atmosphérique parcourue. C'est pour cela, prétend M. Tuma, que la force électrique augmentait moins rapidement qu'elle eût dû augmenter suivant la loi formulée par Exner.

Quoi qu'il en soit, ces expériences établissaient l'existence de masses négatives dans la couche atmosphérique traversée.

142. Tel était l'état de la question, lorsque M. Ch. André (que ses blessures mettaient dans l'impossibilité de continuer ses recherches) voulut bien me confier le soin d'en poursuivre l'étude.

Je fus en conséquence envoyé au Parc aérostatique militaire de Chalais-Meudon. Je trouvai là, sous la direction la plus bienveillante du Commandant Ch. Renard, le concours le plus dévoué ponr la préparation de mes expériences que j'exécutai au cours de deux ascensions libres le 1er et le 9 août 1893, par des jours calmes et beaux, mais malheureusement suivis presque immédiatement de jours pluvieux.

Ce sont ces expériences qui devaient me fournir la matière du travail que je présente aujourd'hui. Je les décrirai plus loin en détail. Mais j'en noterai ici, comme à leur place, les résultats, et j'en expliquerai les conclusions publiées[1].

143. Quand j'aurai dit que les résultats que j'obtenai étaient d'emblée absolument opposés à tous ceux obte antérieurement par des physiciens, que je considérais à jt titre comme plus expérimentés que moi, j'aurai donné i idée de l'état d'esprit qui me fit retarder la publication de travail et juger nécessaire de reprendre ces expériences en

[1] *C. R.*, 1er semestre, 1893, t. CXVII, p. 729.

modifiant le dispositif. On comprendra, j'espère, ma réserve dont s'inspira mon maître, M. Ch. André, en publiant dans une note à l'Académie les conclusions mitigées de mes expériences. On comprendra de même que j'aie pu différer jusqu'à ce jour la reprise d'expériences aussi coûteuses et dont le plan devait être en conséquence très mûri.

Quoi qu'il en soit, voici les résultats que j'obtins dans mes ascensions du 1er et du 9 août 1893 :

1er août		9 août	
Hauteur moy. au-dessus du sol.	Chute de potentiel pour 1 mètre	Hauteur moy. au-dessus du sol.	Chute de potentiel pour 1 mètre
m.	v.	m.	v.
615	+75	824	+37
740	45	830	43
790	35	1060	43
870	26	1255	41
1005	29	1290	42
1100	27	1745	34
1150	38	1940	25
1300	33	2080	21
		2120	19
		2310	18
		2520	16

Ces résultats immédiatement transmis à M. Mascart par M. Ch. André furent présentés à l'Académie des Sciences dans la séance du 27 novembre 1893.

Il résultait tout au moins de ces observations que, *par beau temps, le champ électrique n'est certainement pas croissant avec la hauteur.*

Sous le bénéfice des remarques que j'avais jointes à mes observations, et d'après lesquelles je faisais des réserves sur les cinq dernières séries du 9 août, M. André ajoutait : « La conclusion à laquelle nous nous arrêterions serait que le *champ électrique* est le même au même instant tout le long d'une même verticale; mais nous ne l'émettons que sous forme dubi-

tative, réservant le contrôle de cette question à une ascension ultérieure[1]. »

144. Sur ces entrefaites, M. R. Börnstein, de la Société de Physique de Berlin, avait obtenu que les mesures d'électricité atmosphérique fussent comprises dans le programme des voyages scientifiques effectués avec l'aide des ressources pécuniaires très largement accordées à la *Deutsche Verein zur Förderung der Luftschiffahrt* et il entreprenait des mesures de chute de potentiel dans deux ascensions du ballon le *Phönix* qui eurent lieu à Berlin le 18 août et le 29 septembre 1893, sous la conduite du lieutenant Gross.

Après quelques essais dont j'ai parlé plus haut (§ 37), les collecteurs à écoulement d'eau furent adoptés. L'eau, contenue dans des entonnoirs isolés, au moyen de cordonnets de soie, en dehors de la nacelle, s'écoulait le long de ficelles de 10 à 11 mètres de longueur, à l'extrémité desquelles elle jaillissait librement dans l'air.

145. Dans le premier voyage qui eut lieu par un ciel très pur, le 18 août 1893, entre 9 h. 29 du matin et 7 h. 15 du soir, les valeurs de la chute normale de potentiel pour un mètre se tinrent entre + 88 et — 52 volts. Elles subirent des oscillations considérables et plusieurs fois même affectèrent le signe négatif; mais en somme une *diminution vers le haut* était

[1] En citant ces expériences à la *séance du 16 mars 1894 de la Société de Physique de Berlin*, M. Börnstein paraît n'avoir pas compris les conclusions de M. André. Les nombres publiés accusant une diminution évidente du champ électrique $\frac{dv}{dn}$ (Potentialgefälle), lequel paraissait devenir nul vers 3000 mètres, M. Börnstein a cru que la conclusion de M. André s'appliquait à partir de cette hauteur, c'est-à-dire que l'expression de *champ électrique*, suivant M. André, était synonyme de *potentiel;* celui-ci paraissant en effet devenir constant puisque la chute $\frac{dv}{dn}$ devenait nulle. Mais il n'en est rien, car, ainsi que je l'ai dit, la conclusion de M. André ne tient pas compte des 5 derniers nombres de la série, que j'avais réservés à cause de la faible sensibilité de l'électromètre d'Exner au-dessous de 50 volts.

indubitable. Vers 3000 mètres de hauteur, les déviations étaient si faibles qu'aucune mesure n'était plus possible. « Comme je ne connaissais de mesures semblables que celles de Lecher et de Tuma, qui révélaient une marche opposée, dit M. Bôrnstein, je commençais à craindre que quelque défaut de l'appareil eût occasionné la disparition de la charge. Cependant les déviations de l'électroscope se retrouvèrent lorsque nous repassâmes à la descente à la hauteur de 3000 mètres (la plus grande hauteur atteinte avait été de 3790 mètres), et l'on dut par suite admettre tout d'abord pour ce jour, que la chute de potentiel devenait effectivement plus faible avec l'accroissement de hauteur[1]. »

M. Bôrnstein rattache les oscillations considérables de la force électrique obtenues pendant ce voyage, à l'apparition d'une aurore boréale qui était observée, ce jour-là, sur les côtes allemandes et danoises. La corrélation de ces deux phénomènes résulte en effet des observations faites dans les stations polaires du cap Thordsen.

145. Dans le voyage du 29 septembre 1893, le ciel était un peu nuageux. La chute de potentiel se montra néanmoins plus régulière (maxima $+ 100 \frac{\text{v.}}{\text{m.}}$) et ne présenta pas de signe négatif. Elle *diminua* encore *vers le haut* et ne fut plus mesurable vers 3300 mètres; mais elle augmenta de nouveau à la descente[2].

[1] Ces craintes de M. Börnstein sont à rapprocher des miennes, que je n'eus pas la bonne fortune de pouvoir dissiper par de nouvelles mesures à la descente : celle-ci s'étant effectuée très rapidement après le maximum de hauteur atteinte et avec l'obligation de retirer mes collecteurs de dessous la nacelle.

[2] Le champ sur le sol n'avait pas été mesuré ; mais il n'était certainement pas inférieur à $+ 100 \frac{\text{v.}}{\text{m.}}$. D'ailleurs, les observations de Potsdam révèlent un accroissement continu du potentiel pendant les 4 h. 1/2 qu'ont duré les mesures en ballon. Cet accroissement du champ constaté sur le sol est un fait de plus en faveur de la diminution observée dans la hauteur.

Pour M. Börnstein[1], la conclusion de ses observations (qu'il trouve d'ailleurs en parfait accord avec les miennes) est qu'il y a dans l'atmosphère des masses électriques positives, contrairement à l'hypothèse d'après laquelle de l'électricité négative arrive dans l'air avec la vapeur d'eau.

147. Des mesures électriques ont été encore effectuées dans une excursion du ballon *Phönix*, le 17 février 1894, par M. O. Baschin[2], qui adopta le même dispositif que j'avais employé, c'est-à-dire des tubes de caoutchouc de 12 et 14 mètres de longueur, par lesquels s'écoulait l'eau de deux réservoirs reliés à l'électroscope d'Exner isolé. L'eau était d'ailleurs remplacée par de l'alcool étendu, pour éviter toute congélation. La hauteur atteinte fut environ de 4000 mètres. Le résultat fut encore le même que dans les quatre ascensions précédentes, à savoir : la diminution de la force électrique de bas en haut, de telle sorte qu'à partir d'une certaine hauteur la mesure ne fût plus possible. Les mesures simultanées à terre accusèrent, entre 9 heures du matin et 4 h. 30 du soir, à Potsdam, une variation de 98 à 181 $\frac{\text{volt.}}{\text{mèt.}}$, tandis que M. Baschin obtenait :

	Hauteur moy.	$\frac{v}{m}$ moy.
de 8^h35 à 9^h20 mat.	750^m	$+49^v$
— 10. 0 — 11 17 —	2400	28
— 11.23 — 12. 0 —	2800	13
	> 3000	plus mesurable.

148. En résumé, le résultat commun à toutes ces expériences est que, par beau temps, *le potentiel va en croissant avec la hauteur au-dessus du sol.*

En considérant les surfaces équipotentielles successives, les

[1] Börnstein, *Verhandlungen der physikalischen Gesellschaft zu Berlin*, Jahr 13, p. 45, 1894.

[2] O. Baschin, *Zeitschrift für Luftschiffahrt und Physik der Atmosphære*, Heft III-IV, mars-avril, p. 98, Berlin, 1894.

résultats particuliers les plus nets s'énoncent d'ailleurs de la façon suivante : Dans les expériences d'Exner, les surfaces équipotentielles se succédaient à intervalles irréguliers, mais égaux, en moyenne, depuis le sol jusqu'à 50 mètres ; dans celles de Lecher, les surfaces équipotentielles étaient plus resserrées autour de 550 mètres que près du sol ; dans celles de Tuma, les surfaces de niveau allaient en se resserrant de 410 à 1900 mètres, l'écart à 410 mètres était tel qu'il n'était vraisemblablement pas beaucoup moindre près du sol ; enfin, dans les cinq autres expériences, les surfaces équipotentielles, plus resserrées près du sol qu'à 600 ou 800 mètres, allaient en s'écartant encore, plus ou moins régulièrement, jusqu'au delà de 3000 mètres, altitude à laquelle l'écart entre les surfaces était trop grand pour que les appareils employés permissent de l'évaluer.

149. En accordant à toutes ces expériences le même degré de confiance, on pouvait conclure que : sous nos latitudes moyennes, il existe généralement de l'électricité positive dans l'atmosphère ; mais que dans la couche inférieure, tout au moins jusque vers 2000 mètres, les masses positives sont mélangées avec une quantité parfois plus faible, parfois plus forte, ou à peu près équivalente de masses négatives, et que l'électricité positive, prédominante au-dessus, est en quantité suffisante pour faire équilibre, à une hauteur voisine de 5000 mètres, à l'électricité négative du globe et de l'atmosphère inférieure.

150. Mais, en remarquant que les expériences de Lecher et de Tuma, faites avec le même dispositif — réservoirs descendus au-dessous de la nacelle — donnaient des résultats opposés aux cinq dernières faites avec un dispositif différent — réservoirs sur la nacelle —, on devait craindre que les conducteurs eussent été inégalement soumis à une influence perturbante possible du ballon.

151. L'ensemble de l'aérostat ne peut en effet être considéré comme un corps neutre, mais bien plutôt comme un corps

assez conducteur, capable de se charger par le contact de particules électrisées et aussi, plus ou moins lentement, par influence.

Ces deux effets peuvent se modifier pendant l'ascension du ballon, c'est-à-dire irrégulièrement et peut-être lentement, par suite des pertes ou des gains à la surface et des jets de lest.

152. Il y avait donc lieu de reprendre les expériences en cherchant à s'assurer de l'état électrique du ballon et, dans tous les cas, en modifiant le dispositif expérimental, de façon à soustraire autant que possible les conducteurs à cette influence perturbatrice.

On devait en outre pouvoir poursuivre comparablement les mesures du champ au delà de 3000 mètres.

D'un autre côté, en multipliant les expériences, on augmentait les chances d'éliminer l'influence indéterminée d'une situation atmosphérique particulière, telle que celle qui pourrait provenir, par un ciel également serein, du régime du vent amenant dans l'atmosphère inférieure l'air de régions différentes.

A cet égard, je souhaitais vivement d'effectuer une ascension matinale par un beau temps de vent ferme des régions Nord : ces circonstances étant différentes de celles des expériences effectuées précédemment dans le milieu du jour ou dans la soirée, par temps calme ou par vent faible des régions sud et correspondant, comme le montrent les observations continues à l'Observatoire de Lyon, à des variations plus faibles et plus régulières du champ à la surface de la terre.

Ce sont ces considérations qui m'ont guidé dans l'établissement de mes nouvelles expériences.

TROISIÈME PARTIE

CONTRIBUTION PERSONNELLE

CHAPITRE PREMIER

PREMIÈRES EXPÉRIENCES

153. Le dispositif expérimental employé dans les premières expériences était le suivant : aux deux angles diagonalement opposés de la nacelle était fixé, à l'aide d'une couche isolante de soufre, un réservoir cylindrique en tôle galvanisée de 5 litres. Au fond de chaque réservoir était soudé un tuyau à robinet portant un tube de caoutchouc dont on pouvait, au moyen de raccords vissés à son extrémité, faire varier la longueur depuis 20 mètres jusqu'à 25 mètres et terminé par un ajutage d'écoulement de $0^{mm}2$ de diamètre. Les réservoirs étaient remplis d'eau distillée (dont on avait, en outre, une provision dans la nacelle) et reliés par des fils fins aux deux bornes opposées, d'un électroscope gradué d'Exner porté sur l'angle intermédiaire de la nacelle par une tige d'ébonite de $0^{m}25$ de longueur, soigneusement vernie à la gomme laque.

154. Une différence de potentiel de + 150 volts, établie entre les deux collecteurs ainsi installés, était réduite à + 145 volts au bout de deux minutes. La perte relative pendant ce temps était donc de 1/30. D'ailleurs, l'équilibre électrique des deux collecteurs opposés, avec leur débit de

5 litres d'eau en cinquante minutes, était atteint au bout d'une minute environ.

Les collecteurs ne donnaient donc à chaque instant qu'une différence *proportionnelle* à la différence de potentiel correspondant à la distance verticale connue des orifices d'écoulement. Néanmoins, il suffisait, pour le but que l'on se proposait, que le coefficient de proportionnalité restât constant et que les différences mesurées fussent à chaque instant (en tenant compte de la distance des orifices) dans le même rapport avec l'intensité normale correspondante du champ de l'atmosphère libre.

On s'efforça de maintenir constants, à cet effet, l'isolement et le débit (écoulement) relatifs des deux collecteurs dont les variations ne pouvaient d'ailleurs être qu'accidentelles. La possibilité d'une déformation de l'appareil aérostatique et de son influence sur le champ n'était pas prévue avant la première ascension.

155. L'aérostat *Le Biot*, mis à ma disposition par M. le commandant Ch. Renard, au parc d'aérostation militaire de Chalais-Meudon, était un ballon sphérique de 650 mètres cubes, gonflé à l'hydrogène pur et muni de la soupape métallique Renard.

L'équilibre de potentiel du ballon avec les couches atmosphériques correspondantes à son altitude devait être facilité par des houppes de pointes suspendues, tout autour du ballon au niveau inférieur des cordes équatoriales, et reliées à la soupape par de petits câbles métalliques courant sur l'hémisphère supérieur[1].

[1] Les diverses parties métalliques de la soupape étaient aussi reliées entre elles par un câble métallique descendant jusque dans la nacelle à portée de l'aéronaute, et que celui-ci mettait à l'atterrissage en communication avec la terre avant que la soupape fût trop près du sol. M. le commandant Renard avait adapté ce dispositif aux aérostats munis de soupapes métalliques, pour éviter des effets de condensation et la production d'étincelles, auxquelles on avait pu attribuer la cause d'incendies de ballons, antérieurement survenus en France et en Allemagne.

156. Les ascensions ont été effectuées le 1er et le 9 août 1893. Je transcris ici les résultats de mes observations et les remarques que j'avais rapportés à mon directeur, M. Ch. André. Chacun des nombres des tableaux suivants est la moyenne d'une série de huit à douze lectures faites pendant que l'aérostat, ayant atteint une certaine zone d'équilibre, s'y maintenait en oscillant de moins de 100 mètres, sans nécessiter un jet de lest contre lequel on devait garantir réservoirs et isolants[1].

TABLEAU I.

PREMIÈRE ASCENSION. — *Le Biot :* Capitaine Paul Renard, capitaine Jullien, aéronautes; G. Le Cadet exp.

1893 Août 1. — 7^h20^m — 10^h40^m matin :
Chalais-Meudon — Féricy (Seine-et-Marne), NW-SE :
vent inférieur NNW très faible.

Série	Heure (T.M. Paris)	Altitude moyenne	Δn	ΔV	$\frac{\Delta V}{\Delta n}$	Observations.
—	—	—	—	—	—	—
	h. m.	m.	m.	v.	v.	
1	7.48	615	3,50	+264	+75	Ciel serein, atmosphère inférieure brumeuse.
	Guide-rope largué.					
2	8.14	790	3,00	105	35	Cumulus apparaissent à l'horizon dans épais anneau de brume.
3	8.26	740	3,00	134	45	Nuages à l'horizon se forment en grosses masses.
4	8.31	870	3,00	77	26	Cumulus détachés commencent à courir à une certaine distance.
5	8.45	1005	3,00	87	29	Masses nuag. se multiplient et se rapprochent.
6	9.27	1150	2,00	77	38	Cum. passent fréquemment au-dessous de nous; ils s'élèvent parfois jusqu'à l'extrémité du guide-rope et finalement nous entourent à distance.
7	9.45	1100	3,00	82	27	
8	9.53	1300	3,00	99	33	

[1] J'avais emporté, dans ces ascensions, un thermomètre à mercure et un hygromètre à cheveu, abrités dans une cage à persiennes suspendue dans les cordages à la portée de ma vue. Je m'étais astreint à faire des lectures simultanées de ces instruments avec celles de l'électromètre (soit 127 lectures de chaque instrument dans la deuxième ascension). Mais les comparaisons que j'ai pu faire en outre, dans la deuxième ascension, entre le thermomètre fixe et le thermomètre frondé au dehors et à l'ombre de la nacelle, m'ont convaincu qu'il n'y a rien à fonder sur les données de ces instruments ainsi installés

Remarques. — A 8 heures, on largue le guide-rope. Pendant la deuxième série, on observe plusieurs variations rapides des feuilles de l'électromètre. Entre 9 heures et 9 h. 15, on a des décharges très fréquentes; à ce moment d'énormes masses nuageuses passent à 150 ou 200 mètres au-dessous de nous : l'auréole apparaît. Les ajutages se sont bouchés à plusieurs reprises, pendant la sixième et la septième série, décharges rapides et fréquentes à l'approche de grosses masses nuageuses.

Dans le cours d'une série, les écarts ont souvent varié du simple au double; aussi les différences entre les moyennes des différentes séries ne présentent-elles qu'un caractère accidentel de même nature que celles des observations isolées. L'écart de la première série appelle cependant une discussion. Le développement du guide-rope entre cette série et les suivantes étant la seule chose qui ait été modifiée dans le système du ballon, cet écart doit être imputable à ce nouveau conducteur qui est venu modifier les surfaces de niveau au voisinage des collecteurs. Pendant les trois séries suivantes, le champ paraît décroître assez régulièrement, mais je suis fondé à croire, d'après les écarts individuels, que cette circonstance est fortuite. D'ailleurs, les résultats des séries suivantes prouvent qu'aucune modification permanente n'affectait le système expérimental. Au surplus, les écarts entre les différents résultats sont du même ordre de grandeur que ceux que l'on constate sur les appareils à enregistrement continu installés près du sol.

TABLEAU II.

Deuxième Ascension. — *Le Biot :* Capitaine Hugot, aéronaute; G. Le Cadet exp.

1893, août 9. — 1^h0^m — 5^h35^m soir:
Chalais Meudon — Valhermeil (près Pontoise), SSE — NNW.
vent SSE très faible; Vitesse moyenne 9^{km}; ciel serein.

Série	Heure	Altitude moyenne	Δn	ΔV	$\frac{\Delta V}{\Delta n}$	Observations.
—	h. m.	m.	m.	v	v	—
1	1.47	830	2,00	+85	+43	S.E. Quelques filaments de cirrus apparaissent.
2	1.58	824	»	74	37	
3	2. 7	1060	»	87	43	
4	2.22	1290	»	84	42	SSE (2^h40^m — th. fronde : 21°8; alt. 1350^m).
5	3. 5	1255	»	83	41	
6	3.12	1745	»	68	34	S. Cirrus plus compacts.
7	3.36	1940	3,00	74	25	Cirro-cum. à l'horizon Sud, noyés dans vapeurs et brume très diffuses.
8	3.46	2080	»	62	21	
9	4.14	2120	3,50	68	19	SSW.
10	4.42	2310	»	62	18	W (4^h30^m — th. fronde : 15°,8; alt. 2160^m).
11	4.55	2520	4,50	71	16	SW.

Remarques. — Au départ, près du sol : th. + 32°3, hyg. 32 °/₀.

A 1 h. 30, on largue le guide-rope.

A 2 h. 30, on interrompt les observations; on fait une mesure de l'isolement de l'appareil total, en créant artificiellement, au moyen d'un bâton d'ébonite frotté, une différence de potentiel de 226 volts entre la nacelle et les deux collecteurs : en deux minutes, on a une perte de 60 volts, soit 1/6 de la charge en une minute.

A 2 h. 40, comparaison du thermomètre fronde avec le thermomètre placé dans la cage à persiennes : th. (fronde — cage) = — 5°3.

Pendant ces opérations, chute rapide de l'aérostat, qui tombe de 1300 à 800 mètres en quelques minutes; on enraye la chute par un jet de lest qui retombe en pluie dans la nacelle Je garantis autant que possible les réservoirs et isolants.

A 3 h. 3, on reprend les observations, mais l'écart des feuilles devenant trop faible, on augmente la distance verticale Δn des ajutages, en allongeant un des tubes.

A 3 h. 33, nouvelle série. Les manifestations électriques diminuent de plus en plus, malgré la bonne qualité des écoulements, et cela continue après une nouvelle augmentation de la distance verticale des collecteurs. Je remarque qu'à la reprise de l'écoulement, celui-ci se fait horizontalement et mouille le guide-rope. Je constate en même temps qu'en touchant avec le doigt l'une ou l'autre borne de l'électromètre je ne provoque qu'un écart à peine sensible : mon potentiel est très voisin de celui des collecteurs. Les surfaces de niveau ont dû se modifier près du guide-rope mouillé, et l'équilibre des collecteurs se faire sur des surfaces plus inclinées, de telle sorte que la distance verticale Δn des ajutages ne correspond pas à la direction du champ.

Je mets en conséquence à part les cinq dernières séries de ce tableau.

J'ajoute que les écarts individuels des observations ont été beaucoup moindres dans cette deuxième ascension que dans la première : l'atmosphère était d'ailleurs beaucoup moins troublée.

157. *Remarques sur les conditions et les conséquences de la première ascension.* — La sécurité que m'inspirait l'habileté de mes guides, procédant scientifiquement à la conduite d'un aérostat dont tous les organes étaient éprouvés, me permit d'exécuter mes expériences sans autre souci que celui du but que je poursuivais et, par suite, avec le plus grand soin. Aussi, malgré l'opinion préconçue que j'avais au départ et que je m'étais faite suivant les faits annoncés par le Professeur Exner, j'acquis immédiatement la conviction que le champ n'était réellement pas croissant avec la hauteur.

J'éprouvai néanmoins quelque perplexité à conclure d'après ma première expérience, au cours de laquelle l'intervention du guide-rope d'un côté, des nuages de l'autre, dans le champ du ballon, était venue jeter une perturbation indéterminée mais évidente, tout au moins quant aux nuages, dont l'approche provoquait des décharges rapides des feuilles de l'électromètre.

En fait, dans la première ascension, le départ s'était effectué par un ciel serein et l'atterrissage par un ciel complètement couvert de strato-cumulus bas qui ne devaient pas tarder à donner lieu à une pluie fine et faible.

Les mesures effectuées dans cette première ascension se rapportent donc à un état atmosphérique particulier correspondant à la formation des nuages et de la pluie. Une seconde ascension, par beau temps, était en conséquence nécessaire.

158. *Conditions et conséquences de la deuxième ascension.* — De nouvelles précautions furent prises pour garantir les isolants. Les écoulements d'eau furent augmentés et la provision d'eau en conséquence. Je vernis à la gomme laque les tuyaux de caoutchouc, pour diminuer les effets électriques à la surface.

En raison de l'influence présumée du guide-rope — dont le développement sous la nacelle était jugé nécessaire à une conduite prudente de l'aérostat — je demandai et obtins que ce cordage fût largué avant le début de mes mesures.

Enfin, pour qu'une altitude plus élevée pût être atteinte, on avait décidé qu'un seul capitaine-aéronaute m'accompagnerait.

159. Les nombreuses lectures de thermomètre et d'hygromètre que je fis au cours de cette ascension ne peuvent malheureusement pas (j'ai dit plus haut la raison) être utilisées pour la discussion des mesures électriques corrélatives. Je dois me borner à déduire de ces mesures les conclusions qu'elles comportent, quant au sens de la variation.

Ainsi, au-dessus de 2500 mètres (jusqu'à 2670 mètres, altitude maxima), les manifestations électriques étaient telle-

ment affaiblies que je ne provoquais plus d'écart des feuilles en touchant l'une ou l'autre borne de l'électromètre. Ce fait me surprenait d'autant plus qu'à des altitudes inférieures, et dans la première ascension, je provoquais infailliblement des décharges dans ces conditions. Je crus donc que le système du ballon et des collecteurs ne formaient plus qu'un même conducteur, au même potentiel, par l'intermédiaire des écoulements d'eau dont les gouttes jaillissaient en partie sur le guide-rope.

Je ne pus malheureusement effectuer aucune mesure de contrôle à la descente. Celle-ci devant être rapide en raison de l'altitude atteinte et de la quantité juste suffisante de lest qui nous restait, je dus hâtivement rentrer et organiser mes appareils dans la nacelle[1], pour aider aux manœuvres et parer aux éventualités de l'atterrissage.

Quoi qu'il en soit, le fait qu'une diminution progressive (qui m'avait obligé à augmenter la distance des collecteurs) s'était manifestée, avant que rien d'anormal pût être remarqué, me persuadait que le champ subissait dans les hautes régions un réel décroissement.

[1] Outre que le relèvement des tuyaux de caoutchouc était pénible et long, on ne pouvait, par leur emploi, graduer convenablement la distance verticale des ajutages. L'ensemble des réservoirs, de leur support et des récipients de réserve d'eau, formait un matériel lourd et encombrant qui présentait, surtout à l'atterrissage, des inconvénients pratiques assez sérieux auxquels on devait songer à obvier dans un nouveau dispositif.

Pour M. Börnstein[1], la conclusion de ses observations (qu'il trouve d'ailleurs en parfait accord avec les miennes) est qu'il y a dans l'atmosphère des masses électriques positives, contrairement à l'hypothèse d'après laquelle de l'électricité négative arrive dans l'air avec la vapeur d'eau.

147. Des mesures électriques ont été encore effectuées dans une excursion du ballon *Phönix*, le 17 février 1894, par M. O. Baschin[2], qui adopta le même dispositif que j'avais employé, c'est-à-dire des tubes de caoutchouc de 12 et 14 mètres de longueur, par lesquels s'écoulait l'eau de deux réservoirs reliés à l'électroscope d'Exner isolé. L'eau était d'ailleurs remplacée par de l'alcool étendu, pour éviter toute congélation. La hauteur atteinte fut environ de 4000 mètres. Le résultat fut encore le même que dans les quatre ascensions précédentes, à savoir : la diminution de la force électrique de bas en haut, de telle sorte qu'à partir d'une certaine hauteur la mesure ne fût plus possible. Les mesures simultanées à terre accusèrent, entre 9 heures du matin et 4 h. 30 du soir, à Potsdam, une variation de 98 à 181 $\frac{\text{volt.}}{\text{mèt.}}$, tandis que M. Baschin obtenait :

	Hauteur moy.	$\frac{v}{m}$ moy.
de 8^h35 à 9^h20 mat.	750^m	$+49^v$
— 10. 0 — 11 17 —	2400	28
— 11.23 — 12. 0 —	2800	13
	> 3000	plus mesurable.

148. En résumé, le résultat commun à toutes ces expériences est que, par beau temps, *le potentiel va en croissant avec la hauteur au-dessus du sol.*

En considérant les surfaces équipotentielles successives, les

[1] Börnstein, *Verhandlungen der physikalischen Gesellschaft zu Berlin*, Jahr 13, p. 45, 1894.

[2] O. Baschin, *Zeitschrift für Luftschiffahrt und Physik der Atmosphære*, Heft III-IV, mars-avril, p. 98, Berlin, 1894.

résultats particuliers les plus nets s'énoncent d'ailleurs de la façon suivante : Dans les expériences d'Exner, les surfaces équipotentielles se succédaient à intervalles irréguliers, mais égaux, en moyenne, depuis le sol jusqu'à 50 mètres ; dans celles de Lecher, les surfaces équipotentielles étaient plus resserrées autour de 550 mètres que près du sol ; dans celles de Tuma, les surfaces de niveau allaient en se resserrant de 410 à 1900 mètres, l'écart à 410 mètres était tel qu'il n'était vraisemblablement pas beaucoup moindre près du sol ; enfin, dans les cinq autres expériences, les surfaces équipotentielles, plus resserrées près du sol qu'à 600 ou 800 mètres, allaient en s'écartant encore, plus ou moins régulièrement, jusqu'au delà de 3000 mètres, altitude à laquelle l'écart entre les surfaces était trop grand pour que les appareils employés permissent de l'évaluer.

149. En accordant à toutes ces expériences le même degré de confiance, on pouvait conclure que : sous nos latitudes moyennes, il existe généralement de l'électricité positive dans l'atmosphère ; mais que dans la couche inférieure, tout au moins jusque vers 2000 mètres, les masses positives sont mélangées avec une quantité parfois plus faible, parfois plus forte, ou à peu près équivalente de masses négatives, et que l'électricité positive, prédominante au-dessus, est en quantité suffisante pour faire équilibre, à une hauteur voisine de 5000 mètres, à l'électricité négative du globe et de l'atmosphère inférieure.

150. Mais, en remarquant que les expériences de Lecher et de Tuma, faites avec le même dispositif — réservoirs descendus au-dessous de la nacelle — donnaient des résultats opposés aux cinq dernières faites avec un dispositif différent — réservoirs sur la nacelle —, on devait craindre que les conducteurs eussent été inégalement soumis à une influence perturbante possible du ballon.

151. L'ensemble de l'aérostat ne peut en effet être considéré comme un corps neutre, mais bien plutôt comme un corps

assez conducteur, capable de se charger par le contact de particules électrisées et aussi, plus ou moins lentement, par influence.

Ces deux effets peuvent se modifier pendant l'ascension du ballon, c'est-à-dire irrégulièrement et peut-être lentement, par suite des pertes ou des gains à la surface et des jets de lest.

152. Il y avait donc lieu de reprendre les expériences en cherchant à s'assurer de l'état électrique du ballon et, dans tous les cas, en modifiant le dispositif expérimental, de façon à soustraire autant que possible les conducteurs à cette influence perturbatrice.

On devait en outre pouvoir poursuivre comparablement les mesures du champ au delà de 3000 mètres.

D'un autre côté, en multipliant les expériences, on augmentait les chances d'éliminer l'influence indéterminée d'une situation atmosphérique particulière, telle que celle qui pourrait provenir, par un ciel également serein, du régime du vent amenant dans l'atmosphère inférieure l'air de régions différentes.

A cet égard, je souhaitais vivement d'effectuer une ascension matinale par un beau temps de vent ferme des régions Nord : ces circonstances étant différentes de celles des expériences effectuées précédemment dans le milieu du jour ou dans la soirée, par temps calme ou par vent faible des régions sud et correspondant, comme le montrent les observations continues à l'Observatoire de Lyon, à des variations plus faibles et plus régulières du champ à la surface de la terre.

Ce sont ces considérations qui m'ont guidé dans l'établissement de mes nouvelles expériences.

TROISIÈME PARTIE

CONTRIBUTION PERSONNELLE

CHAPITRE PREMIER

PREMIÈRES EXPÉRIENCES

153. Le dispositif expérimental employé dans les premières expériences était le suivant : aux deux angles diagonalement opposés de la nacelle était fixé, à l'aide d'une couche isolante de soufre, un réservoir cylindrique en tôle galvanisée de 5 litres. Au fond de chaque réservoir était soudé un tuyau à robinet portant un tube de caoutchouc dont on pouvait, au moyen de raccords vissés à son extrémité, faire varier la longueur depuis 20 mètres jusqu'à 25 mètres et terminé par un ajutage d'écoulement de $0^{mm}2$ de diamètre. Les réservoirs étaient remplis d'eau distillée (dont on avait, en outre, une provision dans la nacelle) et reliés par des fils fins aux deux bornes opposées, d'un électroscope gradué d'Exner porté sur l'angle intermédiaire de la nacelle par une tige d'ébonite de $0^{m}25$ de longueur, soigneusement vernie à la gomme laque.

154. Une différence de potentiel de + 150 volts, établie entre les deux collecteurs ainsi installés, était réduite à + 145 volts au bout de deux minutes. La perte relative pendant ce temps était donc de 1/30. D'ailleurs, l'équilibre électrique des deux collecteurs opposés, avec leur débit de

inférieure, à laquelle le collecteur était suspendu. La graduation était faite au moyen de morceaux de faveurs de différentes couleurs, collés à la gutta-percha. Les collecteurs pouvaient ainsi être descendus facilement au-dessous de la nacelle à des distances variables et déterminées. Les fils n'étaient d'ailleurs recouverts d'aucun isolant, afin d'éviter toute condensation.

Les axes métalliques des deux treuils, en communication permanente avec leur fil respectif, pouvaient être reliés aux deux bornes de l'électromètre différentiel.

167. *Electromètre.* — L'électromètre est un électroscope gradué d'Exner modifié. La modification concerne la nature de l'isolant employé. Dans son meilleur état d'isolement, le bouchon d'ébonite verni de l'électromètre d'Exner donne une perte de 1/60 en une minute sur une charge de 150 volts ; quand il a servi longtemps, cette perte dépasse 1/20, encore faut-il avoir soin de le flamber si l'air est humide. Or, je ne pouvais songer à me livrer à cette opération en ballon, si par hasard (en traversant un nuage) elle était devenue nécessaire.

J'ai donc substitué le soufre à l'ébonite [1].

Si le soufre s'est recouvert de buée, il suffit de le sécher au moyen de papier non collé et de le gratter.

J'ai ainsi réalisé un électromètre dont l'isolement est le suivant : 1° la boîte étant reliée à la terre, un écart moyen des feuilles de 180 volts subit une diminution de 10 volts en dix minutes, soit une perte de 1/180 par minute ; 2° la boîte étant portée sur le support isolant adopté (constitué par une colonne de soufre de 25 millimètres de diamètre et de 10 centimètres de longueur fondu autour d'une tige d'ébonite de 15 millimètres × 15 centimètres de dimensions correspondantes) et les feuilles reliées à la terre, la perte en une minute est de 1/140 ; 3° les feuilles et la boîte étant isolées, une déviation de 180 volts reste constante pendant au moins quinze minutes.

[1] En le fondant suivant les prescriptions que m'avait obligeamment données M. le professeur Gouy, voy. § 57, note.

J'ai fait la graduation au moyen d'une pile de 200 éléments Volta, parfaitement isolés sur un plateau de soufre. Cette graduation est d'ailleurs, à très peu près, celle de l'électromètre d'Exner, de mêmes dimensions.

J'ai en outre flambé la face interne des conducteurs latéraux, contre laquelle les feuilles se déchargent ; de telle façon que les feuilles n'y restent que très difficilement adhérentes.

168. *Disposition sur la nacelle.* — Deux légères consoles de bois, fixées sur le bord de la nacelle, portent à 60 centimètres de la paroi correspondante une mince planchette de bois de 15 centimètres de largeur et de $1^{m}25$ de longueur, aux extrémités de laquelle sont pratiquées deux ouvertures de 10 centimètres de diamètre, distantes de $1^{m}10$. Au-dessus de ces ouvertures sont fixés les disques de soufre, aux centres desquels passent les fils enroulés sur les treuils. L'électromètre est porté au milieu de la planchette par sa tige isolante fixée à une douille.

De la nacelle, l'observateur peut ainsi aisément manœuvrer les treuils et faire les lectures de l'électromètre.

169. L'appareil devait se compléter d'un instrument approprié à l'allumage facile et rapide des mèches, ne présentant en outre aucun danger d'inflammation de la masse gazeuse du ballon, au moment où le gaz refoulé par l'appendice, se répandrait en proportion considérable dans l'air ambiant.

L'instrument que j'ai adopté, après une longue série d'essais et d'expériences, est le suivant[1] :

170. *Allumoir.* — L'allumoir est constitué par un crayon de charbon fusant de 20 centimètres de longueur disposé dans une sorte de chandelier à ressort. La pointe en ignition est

[1] Le résultat de ces expériences est que : ni des mèches, ni des charbons fusants ne provoquent l'inflammation du gaz d'éclairage ou de l'hydrogène, dans aucune proportion du mélange de ces gaz avec l'air.

Ce dernier point, fort important, a été établi d'autre part par les soins obligeants de mon collègue et ami, M. Léon Morel, au laboratoire de l'Ecole centrale de Lyon.

complètement entourée d'une toile métallique que l'on retire pour l'allumage. Celui-ci se fait immédiatement par simple contact.

171. Enfin, le matériel d'expérience comportait un psychromètre-fronde, auquel j'ai donné la forme pratique suivante :

Psychromètre-fronde. — Deux thermomètres, l'un à réservoir nu, l'autre à réservoir recouvert de mousseline, sont fixés en deux points sur un petit cadre qui laisse les réservoirs libres. Ce cadre est fixé sur la joue d'une poulie de 2 centimètres de diamètre dont l'axe est porté à l'extrémité d'une planchette en bois léger de 5 centimètres de largeur et de 65 centimètres de longueur. Cette planchette, terminée en forme de poignée, porte, à 45 centimètres de la petite poulie, l'axe d'une autre poulie à manivelle de 9 centimètres de diamètre. En tenant la poignée d'une main, et tournant de l'autre la manivelle de la grande poulie, on imprime par l'intermédiaire d'un cordon, un mouvement de rotation rapide aux thermomètres.

Les thermomètres peuvent ainsi être aisément portés dans l'ombre et à une certaine distance de la nacelle. On doit faire un certain nombre de lectures pour s'assurer que le minimum du thermomètre mouillé est atteint[1].

172. Le premier appareil — dont j'avais moi-même construit les collecteurs et les treuils isolés — fut essayé à une fenêtre supérieure de la Tour des Eaux de l'Observatoire de Lyon, avec un déroulement de 18 mètres de fil. L'électromètre employé était celui d'Exner isolé à l'ébonite verni. La perte à l'air libre des deux collecteurs était respectivement de 1/15 et de 1/17 et l'écart maximum des feuilles était obtenu en moins de dix secondes, avec 10 mètres comme avec 18 mètres de fil déroulé.

Cet écart ne différait d'ailleurs pas sensiblement de celui

[1] J'ai pu comparer, chez M. Besançon à Paris, les données de cet instrument à celles du psychromètre à aspiration du Dr Assmann, installé en plein air, au-dessus d'une pelouse. Autour de 19 degrés — température à laquelle j'ai opéré — les indications des deux instruments concordaient au dixième.

d'un électromètre d'Exner tenu à la main et armé d'une mèche au voisinage immédiat des collecteurs.

173. Le rendement électrique de ce système était donc assez grand et assez constant pour fournir comparablement les différences de potentiel correspondant à divers niveaux relatifs des collecteurs.

On pouvait par suite sans inconvénient faire varier, dans le champ terrestre, la distance verticale des collecteurs pour maintenir l'écart des feuilles dans les limites correspondantes aux potentiels que l'électromètre permettait de mesurer avec une égale précision : soit entre 50 et 200 volts. Il suffisait que les collecteurs fussent assez éloignés du ballon pour que les surfaces de niveau ne fussent pas déformées par l'influence de ce dernier; et c'est ce que mon nouvel appareil devait, en outre, permettre de réaliser et de contrôler aisément.

174. Néanmoins, avant d'entreprendre une ascension coûteuse à grande hauteur, je désirais essayer cet appareil et me familiariser avec sa manipulation, dans les conditions mêmes où il devait être employé. Je m'assurai, dans ce but, le concours dévoué et amical de M. A. Boulade qui se mit obligeamment à ma disposition avec son matériel aérostatique, pour effectuer une ascension à Lyon, par beau temps.

A l'entrée de l'hiver 1896, la nacelle de son ballon *An-nam* (de 800 mc.) était organisée pour recevoir convenablement mes appareils. Mais l'hiver se passa sans présenter aucun jour favorable à l'exécution de mon projet.

Je me décidai alors à profiter d'un beau jour calme, que semblait présager pour le lendemain la situation atmosphérique du 23 mars 1897, bien que ce jour, appartenant à une période de réchauffement extraordinaire, ne dût pas être considéré comme normal.

TROISIÈME EXPÉRIENCE

Ascension.

175. Le 24 mars, dès 6 heures du matin, le ciel étant parfaitement serein et l'air calme, M. Boulade procéda, à l'usine à gaz de Vaise, au gonflement et au gréement de son aérostat. Je procédai, de mon côté, à la mesure de l'intensité du champ, de la température et de l'humidité sur le terre-plein de l'usine. Enfin, le ballon étant gréé, j'installai mes appareils sur la nacelle, dans laquelle je pris place avec M. A. Boulade dirigeant l'ascension, et le départ eut lieu à 10 h. 47.

Le ballon s'éleva assez rapidement; pris successivement par de très faibles courants de SE, d'E, de N, et de NW, il tournoya au-dessus de Lyon et n'entra dans le courant supérieur qu'à l'altitude de 900 mètres, à 11 heures. Il prit alors la direction W 1/4 NW — E 1/4 SE qu'il ne devait plus quitter jusqu'à l'atterrissage.

176. Pendant ce temps j'avais allumé les mèches et descendu hâtivement les collecteurs à 30 mètres et 32 mètres au-dessous de la nacelle.

Un grand écart des feuilles se manifestait déjà rapidement quand, par suite d'une secousse un peu brusque imprimée à la nacelle pendant une manœuvre, un fil se brisait au point d'attache sur son collecteur, qui tombait en tournoyant sur le sol. En prévision d'un tel accident, j'avais emporté des pointes de rechange que je songeais aussitôt à substituer aux anciennes. Cependant, l'autre collecteur continuant à fonctionner, je remarquai que les mèches brûlaient plus rapidement d'un côté de la couronne que de l'autre, et que les fumées des premières se répandaient sur les dernières. Les gaz et les fumées faisant sillage dans le lit du vent, je jugeai inutile de multiplier

les mèches. Je remontai les fils que je munis tous deux d'une simple pointe et d'une mèche à combustion rapide. J'allumai les mèches et procédai à la mise en équilibre des collecteurs descendus tous deux à 30 mètres au-dessous de la nacelle. Le collecteur relié à la boîte de l'électromètre étant alors descendu plus bas et les feuilles accusant une déviation positive très nette de 13 millimètres pour une distance de 5 mètres entre les collecteurs, je fixai les fils à ce niveau et procédai aux mesures, que j'alternai avec quelques déterminations psychrométriques.

177. Cependant, des cirrus avaient envahi le ciel et nous approchions des Alpes qui nous opposaient une barrière de cimes neigeuses et de glaciers infranchissables.

Je dus interrompre les mesures et relever en toute hâte les appareils dans la nacelle au moment où, parvenus seulement à l'altitude de 2300 mètres, nous approchions de la crête des montagnes de l'Epine.

L'atterrissage s'effectua au pied du mont Grelle, sur la commune d'Attignat-Oncin, à quelques kilomètres de Lépin-lac d'Aiguebelette, à $2^h\ 29^m$ soir.

Résultats et discussion des mesures électriques.

178. Les résultats des mesures électriques faites au cours de cette ascension, sont consignés dans le tableau suivant qui donne les mesures (moyennes de trois ou quatre lectures) des différences de potentiel et les valeurs déduites du champ, exprimées en volts par mètre avec l'heure et l'altitude correspondantes.

TABLEAU III

Troisième Ascension (24 mars 1897).

Heure	Altitude	Δn	ΔV	$\frac{\Delta V}{\Delta n}$	Observations.
—	—	—	—	—	—
h m.	m.	m.	v.	v.	
13.12	1680	5	+140	+28	Cirrus.
13.15	1700	»	158	32	
13.17	1780	»	149	30	
13.19	1810	»	155	31	
13.20	1850	»	158	32	Cirro-stratus
13.22	1880	»	145	29	
13.23	1900	»	149	30	
13 40	2200	»	149	30	(1 lecture) 1h30m changement de mèches.
13.51	2300	»	145	29	(1 lecture) Réseau compact de ci-st.

D'après ce tableau, on peut considérer la valeur du champ comme constante pendant toute la durée des mesures et adopter pour cet intervalle de temps, sa valeur moyenne $+ 30 \frac{\text{volt.}}{\text{mèt.}}$ à la hauteur moyenne de 1850 mètres.

179. Or, pendant le même intervalle, le potentiel à l'électromètre enregistreur de l'Observatoire de Lyon variait de 100 à 80 volts, ce qui représente (en réduisant au plan l'appareil employé dans l'ascension) une valeur moyenne du champ de $+ 99 \frac{\text{volt.}}{\text{mèt.}}$ sur le sol plan à l'altitude de 300 mètres.

Donc, en ne considérant d'abord que la valeur relative de ces deux quantités, je conclus que *le champ électrique était certainement plus faible à 1500 mètres de hauteur dans l'air libre que sur le sol.*

180. En outre, la chute normale de potentiel pour 1 mètre, mesurée autour de 8 h. 30, dans la vaste cour de l'usine à gaz et évaluée, à la même époque, de la même façon, sur le plateau de l'Observatoire était :

A l'usine à gaz	(alt. 178^m). . . .	+225 v. (±20)
A l'Observatoire	(alt. 300^m). . . .	+136 v. (±10)

Donc le décroissement du champ, constaté par l'observation dans l'air libre, se manifestait en ce jour, même sur le sol en des lieux d'altitudes différentes.

Ce dernier résultat, conforme à celui des observations de Palmieri et de Denza[1], ne peut être attribué à une déformation des surfaces de niveau résultant d'une exposition différente des instruments : cette déformation serait plutôt en faveur de la décroissance constatée[2].

181. Toutefois, en considérant que les deux lieux d'observation (usine et Observatoire) sont à une notable distance (10 km.) l'un de l'autre, on pourrait attribuer le résultat obtenu à une des causes fortuites qui impriment au phénomène des variations du champ à la surface de la terre, son caractère local. Ce caractère résulte, en effet, de la discussion des observations simultanées recueillies aux Etats-Unis de 1885 à 1888, au moyen d'appareils soigneusement étudiés, comme ceux que j'ai décrits plus haut. D'après M. Mendenhall[3], « des instruments semblables à tout égard, séparés par une distance de quelque cent mètres, pouvaient donner des indications très différentes ». Mais, en admettant même que ces différences puissent se présenter sous un ciel sans nuages, et par le fait d'un brouillard diffus et inégal comme celui qui régnait dans la matinée du 24 mars, on doit reconnaître que la cause, supposée fortuite, qui a produit la diminution observée sur le sol, agissait dans le même sens que la cause générale manifestée par les observations dans l'air libre.

182. On est donc autorisé à penser que le phénomène de la diminution du champ présentait, à partir du sol inférieur, une

[1] Denza, *loc. cit.* Voy. § 89.

[2] Le sol de l'usine est en effet à l'intérieur d'une cour qui, quoique vaste, est moins bien exposée que le plateau de l'Observatoire.

[3] Mendenhall, *loc. cit.*, p. 173.

continuité dans la hauteur telle que, très forte dans les couches voisines du sol, la diminution, par unité de hauteur, allait en s'affaiblissant graduellement, jusqu'à devenir nulle en moyenne entre 1700 mètres et 2300 mètres.

Et, comme cette diminution par unité de hauteur

$$\left(\frac{dV}{dn}\right)_{h+1} - \left(\frac{dV}{dn}\right)_h$$

correspond, d'après la formule de Poisson, à une densité positive $\left(\text{en } \frac{\text{volt.}}{\text{mèt.}}\right)$ de masses électriques influentes répandues dans l'épaisseur d'atmosphère correspondante, on doit conclure que *l'atmosphère inférieure contenait un excès positif de masses influentes réparti en grande proportion dans les couches basses et surtout au voisinage du sol.*

Cet excès positif neutralisait en grande partie, déjà à la hauteur de 1500 mètres, l'influence d'une charge négative de la surface de la terre et laissait subsister plus haut un champ positif dû, soit à un excès négatif propre du globe, soit à un nouvel excès positif réparti en densité très faible dans les altitudes supérieures.

État corrélatif de l'atmosphère.

183. D'ailleurs, cet état électrique de l'atmosphère se rapportait à une certaine distribution des autres éléments, qui a été déterminée, quant à la température et à l'humidité de l'air, au moyen du psychromètre-fronde que j'ai décrit.

Le tableau suivant donne, d'une part la température, d'autre part la tension de vapeur et l'humidité relative (calculées par la formule de Regnault, en fonction de la différence psychrométrique et de la pression) avec l'heure et l'altitude correspondantes :

TABLEAU IV

(24 mars 1897).

Heure T. M. P.	Altitude	Temp.	Th. mé	Tension de vapeur	Humid. relative	Pression bar.
—	—	—	—	—	—	—
h. m.	m.	°	°	mm.	o/o	
9 50	178 (sol)	+17,6	(+14,0)	9,8	65	765
11.15	950	+16,2	(+10,1)	5,7	41	(675) app.
11.30	900	+16,4	(+ 9,9)	5,6	40	(679) —
12. 0	1200	+14,3	(+ 8,3)	5,1	42	(654) —
12. 5	1180	+14,0	(+ 8,0)	4,9	41	(656) —
12.22	1200	+14,0	(+ 7,9)	4,8	40	(654) —
12.43	1400	+12,0	(+ 6,7)	4,6	44	(638) —
13.26	1900	+ 8,1	(+ 4,6)	4,7	58	(599) —
13.52	2300	+ 6,8	(+ 3,7)	4,6	62	(570) —

184. Tout d'abord, dans la matinée de ce jour, une interversion remarquable de la température se révélait par les observations faites dans les trois stations de l'Observatoire de Lyon. Ainsi, on avait :

Mont-Verdun	Alt.	625m.;	min.	+12°7	à 4h2;	température	à 8h mat.	+15°0
Saint-Genis	—	300	—	9,4	5,5	—	—	14,4
Parc	—	175	—	7,3	5,8	—	—	9,2

A 8 h. 30, le ciel était sans nuages, l'air calme (SE 1m), le baromètre était haut (765) et légèrement en ascension ; un brouillard diffus régnait sur Lyon et dans les couches basses, et le champ était très intense [+225 v. (±25)]. C'est à ces conditions que se rapportent, en effet, les mesures du champ faites sur le sol.

L'interversion de température, qui se produit sur la fin du courant descendant nocturne et qui correspond d'ailleurs habituellement aux conditions locales précédentes, n'était plus guère sensible vers 10 heures. Néanmoins, l'anomalie de la distribution des éléments dans les couches inférieures qu'elle signalait, se manifesta encore dans les heures suivantes par une

exagération notable du poids de la vapeur d'eau contenue dans ces couches.

185. Ainsi, à midi, la tension de la vapeur était de $9^{mm},2$ à Saint-Genis; au même moment, à 900 mètres plus haut, elle n'était que de $4^{mm},9$; alors qu'en partant de cette dernière valeur, la formule de Hann assignerait à Saint-Genis une valeur égale à $6^{mm},2$, plus faible de 3 millimètres que la tension réelle.

Par contre, entre 1000 et 2000 mètres, la tension décroissait un peu moins rapidement que ne le comportait la distribution normale qui eût assigné une valeur de $3^{mm},8$ au lieu de $4^{mm},6$ à 2300 mètres.

186. Les particularités de cette distribution de la vapeur se manifestent d'ailleurs dans les coefficients de la formule suivante :

$$p = p_0(1 - 0{,}710\,h + 0{,}236\,h^2),\ [p_0 = 9{,}2];$$

en comparaison avec ceux de la formule analogue de Hann[1]: $p = p_0\,(1 - 0{,}246h + 0{,}157h^2)$, qui représente, d'après les calculs de cet auteur, la distribution normale, tout au moins jusqu'à l'altitude de 7000 mètres.

Cette formule, que j'ai calculée au moyen des huit derniers nombres du tableau précédent et de la valeur $9^{mm},2$ à Saint-Genis, représente la distribution de la vapeur entre midi et 2 heures, à partir du sol de l'Observatoire de Saint-Genis, sur lequel on poursuivait les mesures du champ simultanément avec celles de l'air libre.

Il faut remarquer en outre que, vu du ballon, le sol apparaissait recouvert d'un voile assez dense et irrégulier de brume de 500 à 800 mètres d'épaisseur, d'où l'on peut présumer que la majeure partie des poussières et des fumées atmosphériques était, de même que la vapeur d'eau le même jour, accumulée dans les couches voisines du sol inférieur.

[1] Hann: *Met. Zeitshr.* Vol. IX, p. 193 et suiv., 1874.

Discussion et conséquences.

CARACTÈRE GÉNÉRAL DU CHAMP

187. Ainsi, la décroissance rapide du champ constatée dans cette ascension, entre le sol et une hauteur libre de 1500 mètres, se rapportait à une forte accumulation de vapeur d'eau dans les couches basses, au détriment de l'humidité des couches moyennes comprises entre 1000 et 2000 mètres. Elle correspondait en même temps à une formation brumeuse résultant, au voisinage du sol, de l'accumulation, sous une forte pression, des fumées et des poussières atmosphériques plongées dans un air très humide (quoique non saturé). En outre, en valeurs absolues, la température et la tension de vapeur d'eau de l'air près du sol étaient, dans la moyenne de la journée, de $8^{\circ},1$ et de $2^{mm},3$ plus élevées que dans la moyenne normale de cette époque de l'année.

La valeur observée du décroissement du champ ne correspondait donc pas à la variation normale avec la hauteur à l'époque de l'équinoxe de printemps. Mais elle offrait du moins les conditions les plus avantageuses pour infirmer définitivement les théories qui reconnaissent pour cause des variations du champ électrique, la présence exclusive ou prédominante de masses négatives liées à la vapeur d'eau ou aux particules solides et liquides de l'atmosphère (théories de la deuxième classe. — Voy. Introduction).

Telle est la conclusion négative de ma troisième expérience.

188. Quant au sens affirmatif, il faut remarquer d'abord que les conditions météorologiques relatives des couches inférieures de l'atmosphère étaient, dans la matinée du 24 mars, celles qui se présentent toujours, plus ou moins accentuées, dans la matinée des jours beaux et calmes.

A tout égard, elles représentaient les conditions normales de ce moment de la journée, dans lequel ont lieu successivement les maximums diurnes du champ, de la pression barométrique et de la tension de vapeur dans les couches basses près du sol[1].

De plus, le vent soufflait des régions *Est* (ESE-SE) ; direction qui est généralement celle qui règne, avec une intensité plus ou moins faible, au matin brumeux d'une belle journée.

Les éléments atmosphériques présents dans les couches inférieures de l'atmosphère, au moment des mesures électriques le 24 mars, étaient donc, par leur origine (régions orientales), par leur état physique et leurs situations relatives, et par suite aussi par la nature de leur électrisation, dans les conditions normales correspondantes au début de la période diurne. D'où je conclus que *les couches inférieures de l'atmosphère contiennent normalement, tout au moins dans la première partie de la période diurne, un excès de masses électriques positives répandu en forte proportion dans les couches brumeuses au voisinage du sol.*

189. Cette conclusion peut d'ailleurs être étendue à la période diurne normale entière et, enfin, à la situation atmosphérique normale sous nos latitudes moyennes, en comparant les résultats de la présente expérience à ceux des expériences antérieures de Paris et de Berlin qu'ils justifient, au moins quant au sens.

Au point de vue quantitatif, il y a sans doute lieu de craindre, entre les résultats des diverses mesures, des différences provenant des divers systèmes collecteurs employés. Quoique dans tous les cas, l'isolement ait été bon et surveillé, il y aurait encore probablement lieu de tenir compte des modifications permanentes que peuvent apporter dans le champ naturel les diverses dispositions aérostatiques adoptées. Mais ces modifications doivent être faibles et avoir plutôt un caractère

[1] Ch. André, *loc. cit.*, pl. I.

accidentel dépendant de l'allure de l'ascension ; à peu près la même dans tous les cas.

Quoi qu'il en soit, en comparant entre elles mes mesures du 9 août 1893 à Paris, celles de M. Bôrnstein en septembre 1893, celles de M. Baschin en février 1894, à Berlin, et mes dernières du 24 mars 1897[1], on est frappé de ce fait qu'elles assignent toutes à l'intensité du champ une valeur très voisine de + 30 volts à la hauteur de 1800 mètres avec des valeurs très variables sur le sol inférieur.

En admettant même quelque écart en plus ou en moins, on doit donc tout d'abord reconnaître que *les variations du champ à la surface de la terre se rapportent, à peu près entièrement, à la variation de la somme positive des masses électriques répandues dans les 1500 ou 2000 premiers mètres d'atmosphère (au-dessus du sol inférieur de nos latitudes moyennes).*

190. Ce fait résulte d'ailleurs des observations recueillies par MM. Elster et Geitel[2] au sommet du Sonnblick, à 3000 mètres d'altitude.

Ces physiciens ont en effet reconnu que même au voisinage du sol, à cette altitude, les variations périodiques du champ sont très affaiblies (presque nulles en été), par rapport à celles des stations inférieures, de Wolfenbüttel par exemple. Ces variations y présentent en outre, dans la période diurne, une oscillation pour ainsi dire inverse de celle que l'on observe normalement, pendant la même période, dans les stations basses ; le maximum du matin et le maximum du soir n'apparaissent plus et un seul maximum se produit à l'époque du minimum de l'après-midi. Quant au minimum nocturne, il subsiste en haut comme en bas (mais l'heure nocturne de sa production sur le Sonnblick n'a pas été déterminée).

[1] Celles aussi du 11 sept., comme on le verra.

[2] Elster et Geitel, Beobachtungen der normalen atmosphärischen Elektricität auf dem Sonnblick (*Sitzungsberichte der k. Akad.*, B. CII, p. 1295-1316 Wien 1893.)

CARACTÈRE MÉTÉOROLOGIQUE DES VARIATIONS DU CHAMP MÉCANISME ET SOURCE PRÉSUMÉS DE CES VARIATIONS

191. Le double caractère de la variation diurne du champ électrique que révèlent les observations continues à diverses altitudes rapproche ce phénomène des variations de la pression barométrique et de la tension de vapeur.

La discussion, faite par M. Ch. André [1], des observations de ces phénomènes à l'Observatoire de Lyon, montre qu'il n'existe ni simultanéité dans les heures tropiques, ni corrélation simple dans les amplitudes de leurs variations, mais elle démontre que ces variations dépendent, au moins en partie, de la variation du mode de circulation de l'air.

On est conduit à une dépendance analogue du champ, comme de la pression barométrique avec le mouvement circulatoire de l'air, si l'on considère la variation en latitude de ces éléments.

Les observations électriques sont encore bien insuffisantes pour affirmer le caractère de cette variation. Néanmoins, les mesures comparatives du champ faites par M. Fr. Exner[2], sous les tropiques et sous nos latitudes, les observations faites dans les régions polaires par Scoresby, Bravais, Lemstrôm, Wijkander et surtout par S. A. Andrée [3], conduisent à admettre que l'intensité moyenne du champ à la surface de la terre présente son minimum absolu près du pôle (où elle est à peu près nulle), son maximum sous les latitudes moyennes (tout au moins sur les continents), et un minimum relatif entre les tropiques.

[1] Ch. André, *Relations des phénomènes météorologiques*, p. 110-112, Lyon 1892.

[2] Fr. Exner., Beobachtungen über atmosphärische Elektricität in den Tropen, II *(Sitzungsberichte der k. Akad.*, B. 99, p. 618, Wien, 1890).

[3] Voy. Edlund, *Ann. Chim. et Phys.*, 5e série, t. XVI, p. 95-96 et S. A. Andrée, *loc. cit.* p. 9-10.

Cette variation, comparée à la variation correspondante de la pression[1] montre que la circulation de l'air agit d'une façon analogue pour modifier la valeur de ces deux éléments suivant les parallèles, comme suivant les méridiens, autour du soleil.

192. Or, d'après les résultats des mesures en ballon, on voit que *l'intensité du champ* ou *la densité électrique négative en un point de la surface est normalement équivalente à la somme positive des masses répandues dans une certaine épaisseur d'atmosphère, dépendant de l'étendue apparemment limitée du champ positif au-dessus de ce point.*

Dans l'atmosphère libre, comme sur le sol, l'intensité du champ mesure donc la quantité d'électricité libre contenue dans l'atmosphère au-dessus du lieu d'observation, indépendamment des modifications qui peuvent survenir au-dessous de ce lieu.

La surface de niveau passant par le point considéré peut ainsi être figurée par une surface conductrice sans qu'il en résulte aucun trouble du champ supérieur.

193. Si par suite, à un moment donné, le champ diminue sur le sol et augmente à une certaine hauteur h dans l'atmosphère, on devra conclure que la somme des masses positives au-dessous de h diminue d'une quantité plus grande que celle dont la somme des masses supérieures augmente. Tel est le cas normal de l'après-midi.

Dans ce cas, il peut arriver que le champ ait la même valeur sur le sol qu'à la hauteur h; ce fait correspondrait à la neutralisation complète des masses positives au-dessous de h. Il peut même arriver que le champ s'annule sur le sol tout en conservant une valeur assez forte à la hauteur h. Dans ce cas, la somme des masses inférieures à cette hauteur est négative et égale à la somme positive des masses supérieures. La disper-

[1] Teisserenc de Bort, Etude sur la synthèse de la répartition des pressions à la surface du globe (*Ann. du Bureau central météorologique de France*, Mém. I, C. 1 et suiv., 1887.)

sion, de part et d'autre, des masses positives supérieures, peut d'ailleurs être telle, au-dessus d'un lieu, que le champ devienne faiblement négatif sur le sol.

194. Ce mouvement de masses électriques correspond au mouvement de l'air dans la période active du courant ascendant diurne.

Partant du moment du maximum du matin, relativement auquel les mesures précédentes indiquent un excès positif important dans l'épaisseur de 1000 à 1500 mètres, on peut imaginer que l'*action électrique normale du courant ascendant* correspond à un refoulement vers le haut des masses positives inférieures et à un apport dans l'atmosphère, de masses négatives, enlevées à la surface du sol. Les masses positives refoulées accompagnent en outre l'air qui va se répandre sur les méridiens éloignés du soleil, où se produisent, en partie par ce fait, les maxima du champ, comme aussi ceux de la pression[1].

195. Les mouvements de circulation de l'air, par lesquels s'explique l'onde thermique de la variation diurne du baromètre, peuvent donc rendre compte, d'une façon analogue, d'une partie de la variation du champ. Cette onde ne comporte toutefois qu'un maximum et un minimum : elle ne fournit pas l'explication du minimum nocturne des trois phénomènes, pression, tension de vapeur et champ, qui la comprennent comme composante de leur variation diurne.

Par l'heure tropique très matinale et très générale (2 h. à 4 h.) de sa production, le minimum nocturne du champ présente de l'analogie avec celui de la pression ; mais, par sa valeur relativement à celle du minimum de l'après-midi ou, autrement, par la comparaison des amplitudes diurne et nocturne, le minimum électrique se rapproche de celui de la vapeur d'eau.

[1] Angot, Etude sur la marche diurne du baromètre *(Ann. du Bur. C. Mét. de France*, Mém. B. 342, 1887.

Les remarques précédentes me paraissent fournir l'indication de l'origine des actions auxquelles on doit rapporter la variation de la charge électrique de l'atmosphère. Elles font présumer en effet que la variation du champ participe d'*une action solaire directe sur l'atmosphère*, comme celle qui produit la seconde composante de la variation du baromètre, c'est-à-dire l'onde semi-diurne principale[1], *et d'une action solaire indirecte par le sol*, parallèle à celle qui a pour résultat la production de la vapeur d'eau à la surface de la terre.

Ces actions me semblent se révéler d'ailleurs par des relations déjà établies entre les intensités du champ et du rayonnement solaire. Quoi qu'il en soit je vais montrer comment l'action présumée du courant ascendant permet de rendre compte des résultats obtenus par M. Tuma pour la variation du champ entre le sol et la hauteur de 1900 mètres, et par M. Lecher dans une couche de 600 mètres au-dessus du sol.

EXPLICATION DES OBSERVATIONS DE TUMA ET DE LECHER

196. Les résultats des observations de M. Tuma, que je n'ai aucune raison de rejeter, rentrent dans mes conclusions si je puis admettre que le courant ascendant diurne correspondant, avait une intensité telle qu'il pût refouler et accumuler dans la hauteur, les masses positives des couches basses, tout en répandant dans ces couches des masses négatives empruntées à la charge répandue sur le sol et équivalente à la somme des masses positives supérieures.

Dans ces conditions, en effet, le champ sur le sol peut devenir plus faible qu'à une certaine hauteur (dépendant de l'intensité du refoulement des masses positives et de l'accès des masses négatives) ; il peut même devenir nul ou faiblement négatif.

[1] Angot, *loc. cit.*

Cette explication s'autorise comme on va le voir du mode même de production de la variation diurne et se justifie par les remarques suivantes :

197. D'après les mesures de M. Tuma, le 15 septembre 1892, le champ, qui était de 70 $\frac{\text{volt.}}{\text{mèt.}}$ à 1900 mètres, n'était que de 40 $\frac{\text{volt.}}{\text{mèt.}}$ à 410 mètres et, en raison de cette progression, n'avait plus sur le sol qu'une valeur voisine de $+ 30 \frac{\text{volt.}}{\text{mèt.}}$ D'autre part, la tension de vapeur, qui était de $13^{\text{mm}},8$ à 370 mètres était au plus de $15^{\text{mm}},0$ sur le sol.

Or, d'après la relation[1] établie par M. Fr. Exner entre le poids de vapeur d'eau et la valeur du champ sur le sol par temps normal, à cette valeur de $15^{\text{mm}},0$ de la tension de vapeur devait correspondre, normalement, un champ de $80 \frac{\text{volt.}}{\text{mèt.}}$.

Donc (même en admettant le plus fort coefficient possible du système collecteur à écoulement d'eau employé par M. Tuma), la valeur de $30 \frac{\text{volt.}}{\text{mèt.}}$ était beaucoup inférieure à la valeur normale, bien inférieure même à la valeur moyenne du minimum diurne de la période d'été sous nos latitudes.

Par conséquent, au moment et au lieu où M. Tuma prit ses

1 $\frac{dV}{dn} = \frac{A}{1 + kq_0}$; [$A = 1410$, $k = 1,15$; $q_0 =$ poids de vapeur]

Voy. Exner, *Sitzungsberichte der k. Akad.*, Wien, B. 99, p. 618, 1890. Cette relation — que j'invoque ici parce que les mesures de M. Tuma étaient censées confirmer l'interprétation théorique de son auteur — ne peut pas être considérée comme l'expression d'un fait général. MM. Elster et Geitel (*Sitzungsberichte*, Wien, Bd. CI, p. 820 et suiv., 1892) ont montré en effet qu'à un même poids de vapeur d'eau correspondent, suivant les hauteurs du soleil ou les saisons, des valeurs du champ très différentes, et que la relation d'Exner se ramène plus exactement à une relation, de la même forme, entre l'intensité du champ et l'intensité du rayonnement ultra-violet sur le sol.

mesures, le temps, quoique beau, ne pouvait pas être considéré comme normal, au point de vue électrique.

D'ailleurs, une profonde perturbation s'avançait rapidement à l'ouest du continent européen[1], le baromètre était en baisse, le vent était S. en bas, S.S.W. en haut et encore faible, l'atmosphère basse était limpide. La distribution verticale de la vapeur d'eau était anormale : M. Tuma rapporte qu'il y avait *moins* de vapeur d'eau dans les couches basses qu'il eût dû y en avoir normalement (§ 141) et cela au bénéfice des couches moyennes et élevées. C'était entre 10 h. du matin et 3 h. du soir.

Cette situation correspond, comme on le sait, à un mouvement ascendant de l'atmosphère et, par suite, à une augmentation importante de l'intensité du courant ascendant diurne.

198. D'un autre côté, M. Ch. André[2] a montré qu'un affaiblissement extraordinaire du minimum diurne de la variation normale du champ correspond toujours à une augmentation de l'intensité du courant ascendant diurne, et qu'il peut être tel (par beau temps) « qu'à un courant atmosphérique extraordinairement ascendant corresponde une force électrique également ascendante, c'est-à-dire négative ». Il en a conclu la nécessité de reconnaître un apport dans l'atmosphère de masses négatives, agissantes au moins dans ces conditions. Il a montré de plus que l'exagération de ces deux phénomènes est plus généralement caractéristique du régime de vent de sud.

Les faits précédents se corroborent donc entre eux. Ils sanctionnent mon explication des résultats obtenus par M. Tuma, la seule d'ailleurs qui soit compatible avec mes précédentes conclusions.

199. Il faut remarquer toutefois que cette explication suppose implicitement que, si M. Tuma eût poursuivi plus haut ses mesures, il eût enfin trouvé un champ décroissant.

[1] Voy. *Bulletin international du Bureau central Météorologique de France*, 15 sept. 1892.

[2] Ch. André, *loc. cit.*, p. 144 et p. 103-112.

C'est une supposition que justifie suffisamment le décroissement obtenu dans toutes les autres expériences à grande hauteur, *eu égard à la variabilité de ce décroissement, manifestée dans les deux premiers kilomètres d'atmosphère.*

Il résulte du double caractère même de la variation diurne que, dans cette épaisseur, au cours d'une journée, les couches successives de l'atmosphère ne peuvent pas être considérées comme homogènes ; et un écart comme celui qui a été observé par M. Lecher dans la soirée du 6 juin peut être imputé au mode normal de production du minimum diurne.

200. En raison même de cette condition du champ, et pour pouvoir développer plus loin les conséquences de cette thèse, j'ai jugé qu'il y avait lieu de l'appuyer sur les résultats d'une nouvelle expérience plus complète et plus probante, organisée de façon à rattacher mes dernières mesures aux premières, en fixant la limite du champ positif de l'atmosphère inférieure.

Dans mon ascension d'essai, mon programme n'avait pas été rempli et ne pouvait l'être qu'exceptionnellement par un temps très calme, au-dessus du sol tourmenté de la région lyonnaise. J'ai été assez heureux pour pouvoir, grâce à de nouvelles libéralités, me rendre à Paris et y effectuer, sous la conduite du célèbre aéronaute de la Commission d'aérostation scientifique, M. G. Besançon, une ascension à grande hauteur dont je vais rendre compte.

QUATRIÈME EXPÉRIENCE

Ascension.

201. *Appareil.* — L'appareil employé dans l'ascension d'essai avait dû être reconstruit avec quelques modifications de détail qui rendaient sa manipulation plus sûre et plus aisée.

Les treuils, reconstruits par MM. Boulade frères et Pascal,

étaient reliés, à volonté, à un système multiplicateur qui permettait de remonter les 30 ou 40 mètres de fil en quelques secondes.

Les collecteurs étant en place, le multiplicateur était retiré et les diverses parties de l'appareil gardaient toutes et toujours entre elles la même situation relative.

Les fils de laiton du premier appareil s'étaient altérés au contact du soufre et la rupture qui s'était produite avait eu lieu sur un point de sulfuration. On les avait remplacés en conséquence par du fil de fer galvanisé et légèrement recuit de $0^{mm}3$ (deux fils étirés sous le même poids). Le collecteur n'était formé que d'une pointe que j'avais reconnue suffisante dans ma première expérience. J'avais réussi à obtenir des mèches de 90 centimètres de longueur, brûlant sans résidus appréciables pendant une heure trente minutes, ce qui facilitait beaucoup les mesures.

L'électromètre employé était celui que j'ai décrit, à bouchon de soufre.

L'isolement était tel que, les deux conducteurs isolés étant chargés avec une différence de potentiel de 120 volts, la déviation correspondante de l'électromètre différentiel restait constante pendant au moins quinze minutes. La perte des deux conducteurs isolés était la même et égale sur chacun d'eux à 1/20 de la charge en une minute. L'équilibre de potentiel par les collecteurs était toujours obtenu en moins de vingt secondes.

202. *Aérostat.* — L'aérostat mis à ma disposition par M. Besançon était un ballon sphérique de 1700 mètres cubes, le *Touring-Club*, gonflé au gaz d'éclairage, qui comportait une nacelle très confortable sur laquelle mon appareil avait été préalablement installé et manœuvré [1].

[1] M. Besançon voulut bien d'ailleurs adjoindre, aux instruments nécessaires à la conduite de l'aérostat, un des appareils qui lui servent au sondage de la haute atmosphère. Ces appareils comprennent un barographe, un thermogra-

203. *Ascension.* — L'ascension, décidée le 10 septembre au soir par un temps beau et frais de vent des régions nord avec baromètre élevé et en hausse, fut préparée dans la nuit du 10 au 11 par un clair de lune splendide et un air calme, à l'Usine à gaz de la Villette.

Le jour venu, et entre 5 et 7 heures, je vérifiai mes appareils et j'effectuai quelques mesures du champ, de la température et de l'humidité sur le sol assez dégagé du terre-plein de l'usine. Le vent très faible de N.-E. fraîchissait. L'atmosphère inférieure s'embrumait, mais le ciel restait pur et sans nuages. A 7 heures, l'aérostat était gréé et je prenais place avec M. G. Besançon dans la nacelle. Je n'installai toutefois mes appareils sur leur support qu'après le départ qui eut lieu à 7 h. 17, par un vent frais de N.-E.

Une demi-heure plus tard, j'avais installé mon appareil et vérifié son fonctionnement. Les deux mèches allumées étaient descendues l'une et l'autre à 30 mètres de la nacelle, et je constatais que l'écart des feuilles de l'électromètre était nul.

Je descendis alors le collecteur de la borne-feuilles à 5 mètres au-dessous de l'autre, et dans ces conditions — inverses de celles des précédentes expériences — j'obtenais, dans le champ positif, une déviation négative de 210 volts mesurable avec précision par un écart de 20 millimètres des feuilles. Cet écart ne devait d'ailleurs pas tarder à diminuer ; mais je m'étais imposé comme règle de le maintenir par le déplacement vertical des collecteurs entre 90 et 200 volts, c'est-à-dire entre des limites mesurables avec une égale précision.

De temps en temps, je ramenais les feuilles à l'état neutre

phe et un hygrographe enregistrant leurs indications sur un même cylindre, dont l'ensemble est suspendu à l'intérieur d'un *panier parasoleil.*

Ce panier est en réalité une simple enveloppe cylindrique d'osier de 2 mètres de hauteur garnie de papier, argenté à l'extérieur, noirci à l'intérieur, et qui préserve les organes des instruments de toute influence étrangère à la qualité propre de l'air. Ce panier fut, dans cette ascension, suspendu librement à l'équateur du ballon.

en touchant à la fois les deux bornes de l'électromètre. D'autres fois, en ne touchant qu'une des bornes, je me rendais compte de l'état électrique d'un conducteur en communication avec la nacelle par rapport à l'un des conducteurs. Dans chaque cas, j'avais des décharges de sens inverse qui diminuèrent d'intensité progressivement. Il faut remarquer à ce sujet que le mouvement d'ascension s'opérait difficilement et exigeait un jet presque continu de lest — qui devait tendre à maintenir constamment l'aérostat en équilibre de potentiel avec la couche d'air où il flottait. — Et c'est en effet le résultat que j'ai constaté.

Je surveillais la combustion des mèches : la traînée de gaz chauds et de fumée était toujours sensible. Les traces d'oxyde de plomb formé tombaient d'ailleurs aux moindres vibrations imprimées à la nacelle ; de telle sorte que, quoique la combustion fut légèrement ralentie aux grandes hauteurs, le cône en ignition était toujours assez bien dépouillé. L'écart maximum des feuilles était d'ailleurs obtenu en moins de 25 secondes, à l'altitude maxima atteinte pendant les mesures, soit 4150 mètres.

A 9 h. 30, le ballon atteignait sa zone d'équilibre supérieure. M. Besançon l'y maintint pendant une heure et demie environ. J'avais remplacé les mèches et continuai mes mesures dans la plus grande partie de cet intervalle, avec une distance de 10 mètres entre les collecteurs. Les feuilles de l'électromètre étaient très calmes.

A 10 h. 24, j'interrompis les mesures : l'écart ne variait plus. Le mouvement de descente commençait à s'accuser et M. Besançon ne jugeait pas prudent de l'enrayer pour gagner de plus grandes altitudes. Le lest restant était nécessaire pour parer aux difficultés d'atterrissage, que le mugissement du vent sur le sol — perceptible à cette haute altitude — nous faisait présumer.

204. Le ciel était resté très pur pendant toute la durée des mesures ; l'horizon était cerné par un banc de brume, blan-

châtre et diffuse à l'E., grise à l'W. A l'extrême horizon S.-E., on remarquait de longues et minces strates de nuages rosés.

Dans les bas-fonds des régions E., les brouillards assez denses formaient une mer houleuse. A 3000 et 4000 mètres, le ciel était d'un bleu noir profond et très pur.

Cependant, vers 10 heures, des mamelons de cumulus commençaient à émerger du banc de brume; et à 10 h. et demie quelques condensations floconneuses apparaissaient à l'altitude présumée de 1500 ou 2000 mètres.

A 11 heures, je dus remonter les fils et organiser mes appareils dans la nacelle[1]. L'ascension scientifique avait pris fin.

L'atterrissage s'effectua à midi 20^{m}, sur un territoire de la commune d'Andigné, canton de Lion-d'Angers (Maine-et-Loire.

Grâce à l'habileté de mon aéronaute — auquel je suis heureux de rendre un cordial hommage — les robustes engins d'arrêt de son aérostat avaient triomphé heureusement des rafales violentes qui assaillaient le ballon à demi-dégonflé.

Nous avions exploré 4 kilomètres d'atmosphère et parcouru dans une direction constante E.N.E.-W.S.W., au-dessus d'un sol à peu près plan, une distance de 330 kilomètres avec une vitesse moyenne de 64 kilomètres à l'heure.

Résultats et Discussion des mesures électriques.

205. Les mesures électriques, faites au cours de cette ascension sont consignées dans le tableau suivant qui donne les mesures individuelles des différences de potentiel observées et les valeurs déduites du champ, exprimées en volts par mètre, avec l'heure et l'altitude correspondantes.

[1] Le guide-rope ne fut largué qu'à ce moment.

TABLEAU V (11 Septembre 1897).

N°	Heure (T. M. Paris)	Altitude au-dessus du sol (50 m)	Δn	ΔV	$\frac{\Delta V}{\Delta n}$	Remarques
—	—	—	—	—	—	—
			Sur le sol.			
»	6.30	»	1,60	> 300	> 200	décharges.
»	35	»	1,00	170	170	oscillations rapides.
»	»	»	»	147	147	
»	»	»	»	152	152	parfois décharges,
»	»	»	»	175	175	parfois 100 volts,
»	6.50	»	»	168	168	dans masses de brouillard léger.
			En ballon.			
1	7.55	1120	5	220	+ 44,0	équilibre en 15 sec.
2	57	1050	»	210	42,0	
3	58	1120	»	220	44,0	borne-feuilles reliée à la mèche inférieure
4	59	1150	»	210	42,0	
5	8. 0	1260	»	206	41,2	borne-boîte reliée à la mèche supérieure.
6	1	1300	»	197	39,4	
7	2	1370	»	188	37,6	
8	3	1400	»	180	36,0	déviation négative constatée avec ébonite frotté.
9	5	1420	»	174	34,8	
10	7	1400	»	210	42,0	
11	10	1550	»	201	40,2	
12	13	1550	»	169	33,8	
13	17	1700	»	139	27,8	
14	19	1650	»	163	32,6	
15	21	1700	»	144	28,8	
16	22	1750	»	138	27,6	borne-boîte touchée seule, décharge brusque.
17	23	1800	»	133	26,6	équilibre en 18 sec.
18	25	1900	»	124	24,8	
19	26	2040	»	118	23,6	
20	27	2080	»	119	23,8	
21	30	2100	»	112	22,4	
22	32	2140	»	110	22,0	
23	33	2200	»	110	22,0	
24	34	2200	»	109	21,8	
25	35	2200	»	110	22,0	

N°	Heure (T. M Paris)	Altitude au-dessus du sol (50 m.)	Δn	ΔV	$\frac{\Delta V}{\Delta n}$	Remarques
—	—	—	—	—	—	—
			En ballon *(Suite).*			
	h m	m	m	v	v	
26	8.37	2200	5	(121)	+ (24,2)	
27	39	2300	»	101	20,2	écart anormal de comb tion par *lest.*
28	41	2350	»	106	21,2	
29	42	2400	»	115	23,0	
30	43	2400	»	114	22,8	
31	45	2400	»	106	21,2	
32	48	2500	»	112	22,4	borne-boîte touchée se décharge assez vive.
33	49	2590	»	103	20,6	équilibre en 18 sec.
34	50	2600	»	104	20,8	
35	51	2670	»	108	21,6	
36	51,5	2700	»	106	21,2	
37	52	2760	»	100	20,0	
38	53	2700	»	112	22,4	
39	55	2700	»	112	22,4	
40	57	2850	»	108	21,6	
41	8.58	2920	»	98	19,6	borne - feuilles touc seule, diminution pide à zéro, puis charge.
42	9. 0	3000	»	95	19,0	
43	1	3060	»	103	20,6	
44	2	3050	»	(123)?	(24,6)	écart anormal de comb tion par *lest.*
45	3	3050	»	112	22,4	
46	4	3100	»	104	20,8	
47	5	3120	»	93	18,6	
48	5,5	3120	»	93	18,6	
49	6	3140	»	93	18,6	9 h. 7 m. équilibre en sec.
50	8	3200	»	87	17,4	
51	8,5	3240	»	89	17,8	
52	12	3360	»	95	19,0	
53	13	3350	»	100	20,0	
54	15	3350	»	99	19,8	
55	18	3520	»	85	17,0	
			Renouvellement des mèches, augmentation de leur distance Δn			
56	9.37	4040	10	142	14,2	équilibre en 20 sec.
57	40	4050	»	120	12,0	
58	41	4050	»	144	14,4	
59	42	4030	»	136	13,6	

N°	Heure (T. M. Paris)	Altitude au-dessus du sol (50 m.)	Δn	ΔV	$\frac{\Delta V}{\Delta n}$	Remarques
—	—	—	—	—	—	—
			En ballon *(Suite).*			
	h m	m	m	v	v	
60	9.43	4040	10	134	+ 13,4	
61	46	4000	»	128	12,8	
62	47	4040	»	131	13,1	
63	51	4050	»	135	13,5	9 h. 48 m. borne-boîte touchée seule :
64	53	4050	»	136	13,6	décharge lente sans diminution.
65	54	4150	»	112	11,2	
66	55	4050	»	128	12,8	9 h., 49 m. 5 borne-feuilles touchée seule : diminution à zéro, puis décharge faible. équilibre en 20 sec.
67	56	4050	»	138	13,8	
68	57	4100	»	126	12,6	
69	10. 0	4080	»	144	14,4	
70	1	4050	»	137	13,7	
71	2	4000	»	140	14,0	cum. à l'horizon W.
72	5	3940	»	118	11,8	
73	5,5	3920	»	140	14,0	
74	6	3900	»	140	14,0	
75	7	3900	»	144	14,4	équilibre en 17 sec.
76	12	4080	»	136	13,6	borne-feuilles touchée seule :
77	14	4000	»	140	14,0	diminution à zéro et faible écart de 60 v.
78	15	4000	»	142	14,2	borne-boîte touchée seule : décharge faible.
79	19	3940	»	118	11,8	
80	22	3950	»	138	13,8	petits cum. en formation vers 2000 m
81	24	3900	»	148	14,8	

206. Ces mesures considérées individuellement et dans leur succession présentent des écarts accidentels dus aux erreurs de lecture, aux oscillations en hauteur de l'aérostat et vraisemblablement aussi aux oscillations mêmes du champ. Il y a donc lieu, pour déterminer la loi de variation avec la hauteur, de faire le départ des écarts dus à chaque cause et de grouper les mesures en vue d'éliminer ces écarts dans des moyennes.

207. Le sens de la variation se manifeste néanmoins immédiatement par les remarques suivantes :

Les mesures ont été effectuées pendant la période diurne

d'accroissement général du champ, et l'on doit admettre que cet accroissement s'est produit normalement dans les couches basses et brumeuses, en ce jour de ciel serein, sur toute la région parcourue, de 6 h. 30 à 10 h. 30.

Dans tous les cas, il n'a pas pu être inférieur, en moyenne, à la moyenne des oscillations observées le matin sur le sol, c'est-à-dire à + 150 volts.

En outre, le sol des régions parcourues était partout à peu près de la même nature et ne présentait que de faibles dénivellations.

On peut donc faire abstraction de la distance parcourue et du temps employé à la parcourir, et considérer les mesures comme se rapportant à l'état électrique (à 9 heures du matin) uniquement relatif aux différents niveaux de la couche d'air qui entraînait le ballon dans son mouvement général, à peu près uniforme et parallèle aux lignes isobarométriques[1].

208. En considérant d'abord le groupement rationnel des vingt-six mesures, faites pendant que le ballon se maintenait dans sa zone d'équilibre supérieure autour de 4000 mètres, on trouve que la moyenne de ce groupe assigne à *l'intensité du champ* une valeur bien déterminée de :

$$\frac{dV}{dn} = + 13^{vm},4\,(\pm 1^{v}) \text{ à } 4014^{m}, \text{ au-dessus du sol ;}$$

de même signe et *plus faible*, de 137^{vm}, que la valeur

$$\frac{dV}{dn} = + 150^{vm}\,(\pm 20^{v}) \ldots \text{ sur le sol.}$$

209. D'après le théorème de Green, et en prenant avec Exner 1 volt = 0,0033 unités électriques C.G.S., on doit considérer d'après ce résultat que : un cylindre d'atmosphère de 4 kilomètres de hauteur et de 1^{cmq} de section contenait *un excès de masses positives influentes* égal à

$$0{,}000360 \text{ U. E. cgs. ;}$$

[1] *Bulletin international du B. C. M.*, 11 septembre 1897.

alors que, sur le sol plan, la section de ce cylindre était chargée d'une *quantité de masses négatives* égale à

$$0{,}000394 \text{ U. E. cgs :}$$

ce qui fait présumer dans l'atmosphère au-dessus de 4000 mètres une distribution de masses positives en quantité égale à

$$0{,}000034 \text{ U. E. cgs,}$$

dans un cylindre de 1^{cmq} de section, dont la hauteur reste indéterminée.

210. Outre les vingt-six mesures de la zone supérieure, considérons maintenant celles qui ont été faites pendant que le ballon s'élevait d'un mouvement graduel et à peu près uniforme, tout en oscillant de 50 mètres au plus (comme le montre la série de mes lectures).

Aucun écart systématique ne se révèle, dû au sens ou à la rapidité de ces oscillations pendant l'intervalle des mesures. Il faut d'ailleurs admettre un écart moyen de $\pm$ 10 mètres, sur la hauteur assignée aux lectures électrométriques.

Ces dernières comportent en outre une erreur de $\pm$ 5 volts pour 100 volts, ce qui correspond à un écart accidentel de $\pm$ 2 volts à 1 volt sur la valeur déduite du champ dans la première et la seconde partie des observations.

211. On peut donc former le tableau suivant des deux séries de mesures, ordonnées suivant les altitudes croissantes, et en déduire, par des groupements rationnels à peu près arbitraires, les valeurs du champ à différents niveaux de la couche d'atmosphère explorée :

TABLEAU VI

Altitude mesurée	Altitude moy.	Champ mesuré	$\frac{\Delta V}{\Delta n}$ moy.	Altitude mesurée	Altitude moy.	Champ mesuré	$\frac{\Delta V}{\Delta n}$ moy.
1050		42		3000		19,0	
1120		44		(3050)		(24,6) [2]	
1120	1140	44	+42,64	3050	3037	22,4	20,07
1150		42		3060		20,6	
1260		41,2		3100		20,8	
1300		39,4		3120		18,6	
1370		37,6		3120	3136	18,6	18,80
1400	1378	36,0	37,96	3140		18,6	
1400		42,0		3200		17,4	
1420		34,8		3240		17,8	
1550		40,2		3350		20,0	
1550		33,8		3350	3364	19,8	18,72
1650	1630	32,6	32,64	3360		19,0	
1700		27,8		3520		17,0	
1700		28,8			**Deuxième Série**		
1750		27,6		3900		14,0	
1800		26,6		3900		14,4	
1900	1914	24,8	25,28	3900	3912	14,8	13,80
2040		23,6		3920		14,0	
2080		23,8		3940		11,8	
2100		22,4		3940		11,8	
2140		22,0		3950		13,8	
2200	2118	22,0	22,04	4000	3978	14,0	13,56
2200		21,8		4000		14,2	
2200		22,0		4000		14,0	
(2200)		(24,2) [1]		4000		12,8	
2300		20,2		4030		13,6	
2350	2370	21,2	21,68	4040	4030	14,2	13,42
2400		23,0		4040		13,4	
2400		22,8		4040		13,1	
2400		21,2		4050		12,0	
2500		22,4		4050		14,4	
2590		20,6		4050	4050	13,5	13,26
2600	2612	20,8	21,32	4050		13,6	
2670		21,6		4050		12,8	
2700		21,2		4050		13,8	
2700		22,4		4050		13,7	
2700		22,4		4080	4085	13,6	13,22
2760	2786	20,0	21,20	4080		14,4	
2850		21,6		4100		12,6	
2920		19,6		4150		11,2	

[1] et [2] Mesures non comprises dans les moy. Voy. tab. V.

212. Portons maintenant, dans un système de coordonnées rectangulaires, les hauteurs moyennes des groupes successifs en ordonnées et les valeurs correspondantes du champ en abscisses, puis réunissons les points ainsi déterminés par une courbe. Nous aurons figuré la variation du champ, de telle façon qu'en évaluant par leur tangente les inclinaisons, sur l'axe des hauteurs, des tangentes successives à la courbe, nous aurons les valeurs successives et le signe de la dérivée, soit la valeur et le signe de la densité des masses électriques de l'atmosphère aux différentes hauteurs.

La variation du champ observée est ainsi représentée dans la planche III par une courbe continue entre 1100 et 4000 mètres.

213. A première vue, cette courbe présente entre 1500 et 3300 mètres une singularité qui a, par sa continuité et son amplitude, le caractère d'une réelle anomalie.

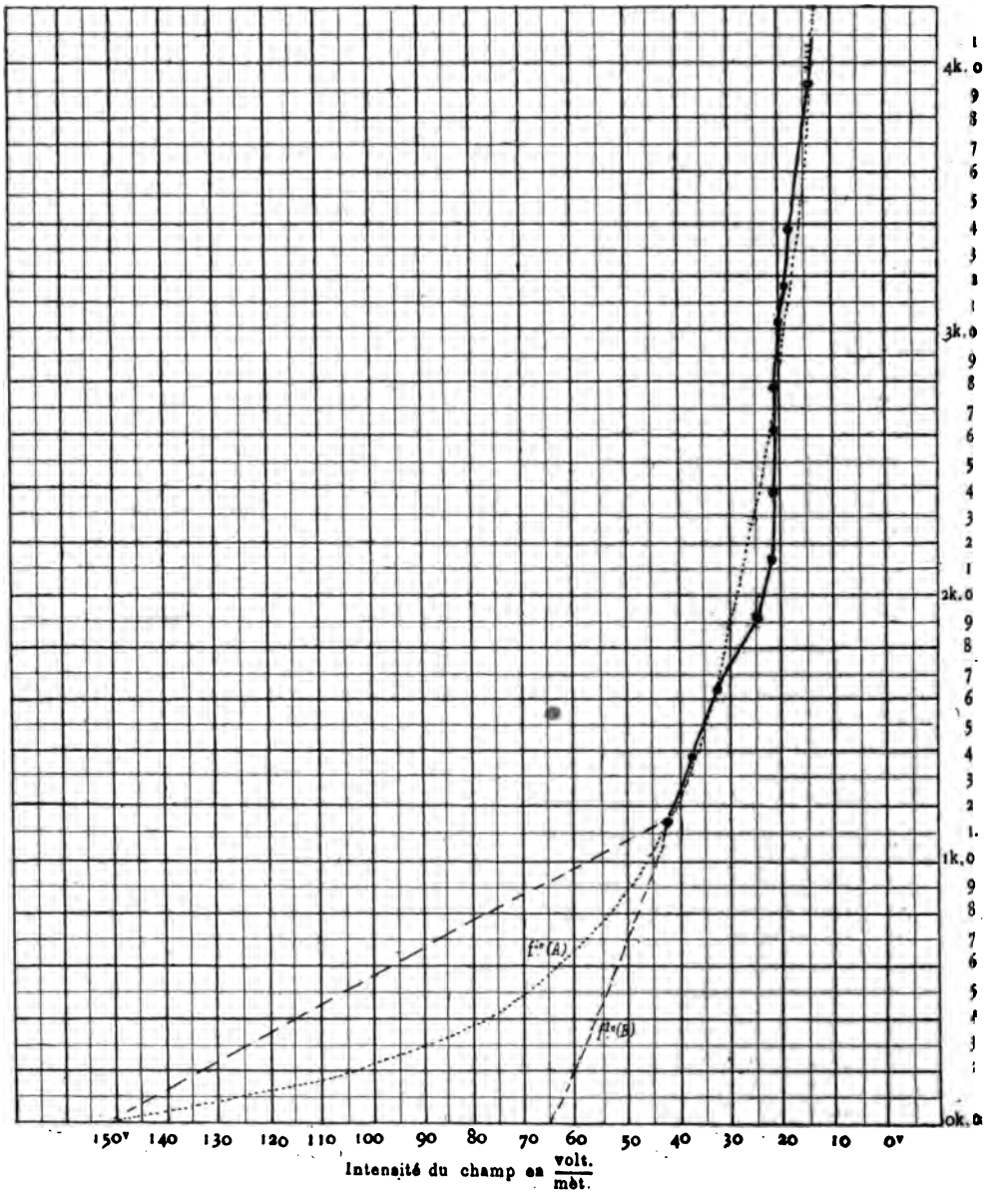
En considérant la dérivée, on voit que de 1600 à 2000 mètres la densité positive est accrue au détriment de la couche atmosphérique comprise entre 2200 et 3000 mètres, dont la neutralité est à peu près complète. Une anomalie semblable mais plus faible se révèle entre 3000 et 3500 mètres.

Si ces anomalies sont réelles, elles correspondent à une perturbation de l'atmosphère à leur niveau, et cette perturbation doit se révéler dans la distribution des autres éléments.

C'est ce que montrent, en effet (voir plus loin), les diagrammes fournis par l'enregistreur, mais mieux encore mes mesures de température et d'humidité, et c'est ce qu'explique, comme je l'indiquerai d'autre part, la distribution générale des pressions.

Cette constatation me suffit pour l'instant. En attestant, d'une façon heureuse et inattendue l'exactitude de mes mesures, elle en autorise les conclusions et les conséquences.

214. Maintenant, la singularité de la courbe observée peut être mise en évidence par la comparaison avec une courbe calculée au moyen des nombres observés, et représentative du phénomène général.



Pl. III. — Ascension du 11 septembre 1897 :
Variation du champ avec hauteur.

Si, dans ce but, on cherche à représenter la variation du champ observée, en elle-même (sans souci des relations qu'elle peut avoir avec les autres éléments), et dans l'ensemble des mesures, y compris la valeur observée sur le sol, on se convainc que, ni la forme parabolique, ni la forme exponentielle simple ne peuvent rendre compte, à la fois, de la variation qu'assignent au champ les mesures faites au-dessus de 1100 mètres et la valeur observée sur le sol.

Chacune de ces formes donne pourtant une représentation satisfaisante de la variation générale observée entre 1100 et 4000 mètres, et fait apparaître l'anomalie signalée autour de 2000 mètres. Mais chacune assigne au champ sur le sol une valeur inférieure, de 70 volts à 90 volts, à la valeur observée.

Ainsi, l'exponentielle simple :

$$\frac{dV}{dn} = ma^h \; ; \; [m = 61^{\text{v}},4; \; a = 0,99646; \; h \text{ en décam.}]$$

représente la courbe observée; mais elle ne peut donner la valeur 150 volts sur le sol et d'autre part, une limite du phénomène, que par une correction empirique qui conduit à cette formule :

$$\text{(A)} \; \frac{dV}{dn} = (ma^h - 1) + (nb^h - 1); \; [n = 90^{\text{v}},6; \; b = 0,9716]$$

laquelle assigne au champ une limite supérieure vers 9700 mètres. Une formule analogue à celle que Biot a imaginée pour la distribution du magnétisme dans les aimants, telle que celle-ci :

$$\text{(B)}\ldots\ldots \frac{dV}{dn} = 65,^{\text{v}}75\,(0,67^h - 0,67^{(2l-h)}); \; l = \text{limite};$$

donne une limite vers 8000 mètres, mais un champ de 66 volts sur le sol.

Les coefficients de ces deux formules, calculés par la méthode

des moindres carrés, au moyen de la série des nombres (moyennes) observés, conduisent d'ailleurs à la même courbe entre 1200 et 4000 mètres. Cette courbe (représentée en pointillé dans la pl. III) met en évidence l'anomalie de la variation autour de 2000 mètres, mais les deux formules qui la fournissent n'ont aucune signification physique. Elles sont, de plus, tout à fait arbitraires : la première n'a pas une forme rationnelle, la seconde néglige l'observation sur le sol.

215. Il y a évidemment une indétermination due au manque de mesures entre le sol et 1100 mètres. Mais, quelle qu'ait pu être la loi de la variation dans cet intervalle, on peut déjà affirmer qu'*elle n'était pas la même que celle de la variation moyenne entre 1100 et 4000 mètres, et qu'elle représentait par conséquent, par rapport à cette dernière, une véritable anomalie.*

216. Quoi qu'il en soit, rien ne s'oppose à ce que l'on considère à part la variation des couches élevées. Et si cette variation conduit à une relation bien déterminée avec un des éléments météorologiques mesurés d'autre part, on sera par ce fait en mesure d'assigner à la variation des couches basses son véritable caractère et la cause probable de sa production.

Du reste, on peut dès maintenant reconnaître à l'état électrique, apparemment anormal, des couches basses, un double caractère d'importance et de généralité.

217. Ainsi, dans le cas actuel, cet état électrique équivalait lui seul, à plus des 2/3 du champ mesuré à la surface de la terre, où d'ailleurs des oscillations rapides atteignant 50 volts, étaient entièrement attribuables à ses modifications brusques.

C'est un résultat analogue à celui de ma précédente expérience et tellement habituel que, dans ce cas encore, les variations du champ sur le sol avaient lieu à peu près indépendamment du champ autour de 1800 mètres où sa valeur était, comme je l'ai trouvé précédemment, très voisine de 30 volts. D'où cette conclusion que je rappelle et dont j'affirme par suite les conséquences : *les variations du champ à la surface de la Terre se*

rapportent à peu près entièrement à la variation de la somme positive des masses électriques répandues dans les 1000 ou 1500 premiers mètres d'atmosphère (au-dessus du sol inférieur de nos latitudes moyennes).

Maintenant pour pouvoir tirer des conclusions nouvelles de cette expérience, pour rendre compte des anomalies et en déduire quelque conséquence, il faut d'abord déterminer, par les mesures faites d'autre part, les variations corrélatives des autres phénomènes et l'état correspondant de l'atmosphère.

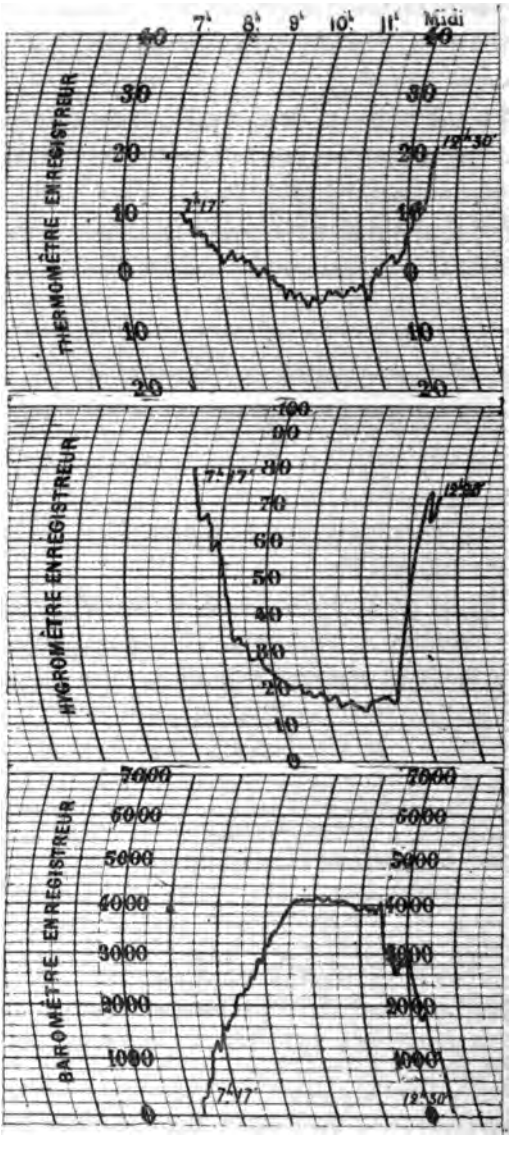
État corrélatif de l'atmosphère.

218. J'ai fait des mesures de température et d'humidité de l'air, avec mon psychromètre-fronde[1]: sur le sol, avant le départ et à diverses hauteurs pendant l'ascension, dans quelques intervalles des mesures électriques.

Voici le tableau de ces mesures et des quantités qui s'en déduisent : la tension de vapeur et l'humidité relative ont été calculées par la formule de Regnault : j'y joins les valeurs correspondantes des éléments à Paris.

[1] Je me servirai de ces déterminations, de préférence à celles des instruments enregistreurs, parce qu'elles se rapportent à des instants et à des hauteurs individuellement mieux déterminés que d'après les diagrammes à petite échelle de ces instruments. La figure ci-contre donne ces diagrammes en vraie grandeur. Il faut considérer que la mise en équilibre est toujours assez lente dans l'hygromètre et les mesures normales doivent servir à contrôler les indications de l'enregistreur, plutôt que celles-ci ne peuvent être employées à contrôler les premières. Néanmoins, on peut voir que les singularités et l'amplitude totale des variations des éléments mesurés figurent exactement sur les courbes enregistrées.

Cette comparaison prouve le parfait fonctionnement du dispositif parasoleil imaginé et employé par MM. Hermite et Besançon pour le sondage de la haute atmosphère.



Courbes de l'enregistreur de MM. Hermite et Besançon obtenues au cours de l'ascension du *Touring-Club*, le 11 septembre 1897

TABLEAU VII (11 Septembre 1897.)

Heure T. M. P.	Altitude au-dessus du sol de Paris	Temp.	(Th. m.)	Tension de vapeur	Poids* de vapeur dans 1 mc	Humidité relative	A PARIS (Tour St-Jacques) Temp.	Tension vapeur	Hum.
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
h m	m			mm	g	%		mm	%
7.10	1	+10°4	(+ 8°8)	7,50	7,65	80	+10°5	7,53	81
8. 6	1400	+ 3,7	(+ 0,4)	3,07	3,21	51	12,0	7,73	74
8.15	1690	+ 2,4	(— 1,4)	2,52	2,65	46	12,4	7,72	72
8.30	2100	+ 1,7	(— 2,5)	2,11	2,25	41	12,6	7,59	70
8,57	2780	+ 0,2	(— 5,3)	1,02	1,08	22	13,0	7,41	67
9.11	3300	— 2,4	(— 7,6)	0,74	0,79	19	13,3	7,53	66
9.18	3500	— 2,7	(— 8,2)	0,57	0,61	15	13,4	7,47	65
9.46	3980	— 5,7	(—10,2)	0,63	0,68	21	13,7	7,41	63
9.50	4050	— 6,1	(—10,8)	0,48	0,52	17	13,8	7,35	62
9.59	4100	— 6,0	(—10,7)	0,51	0,55	18	14,0	7,35	62

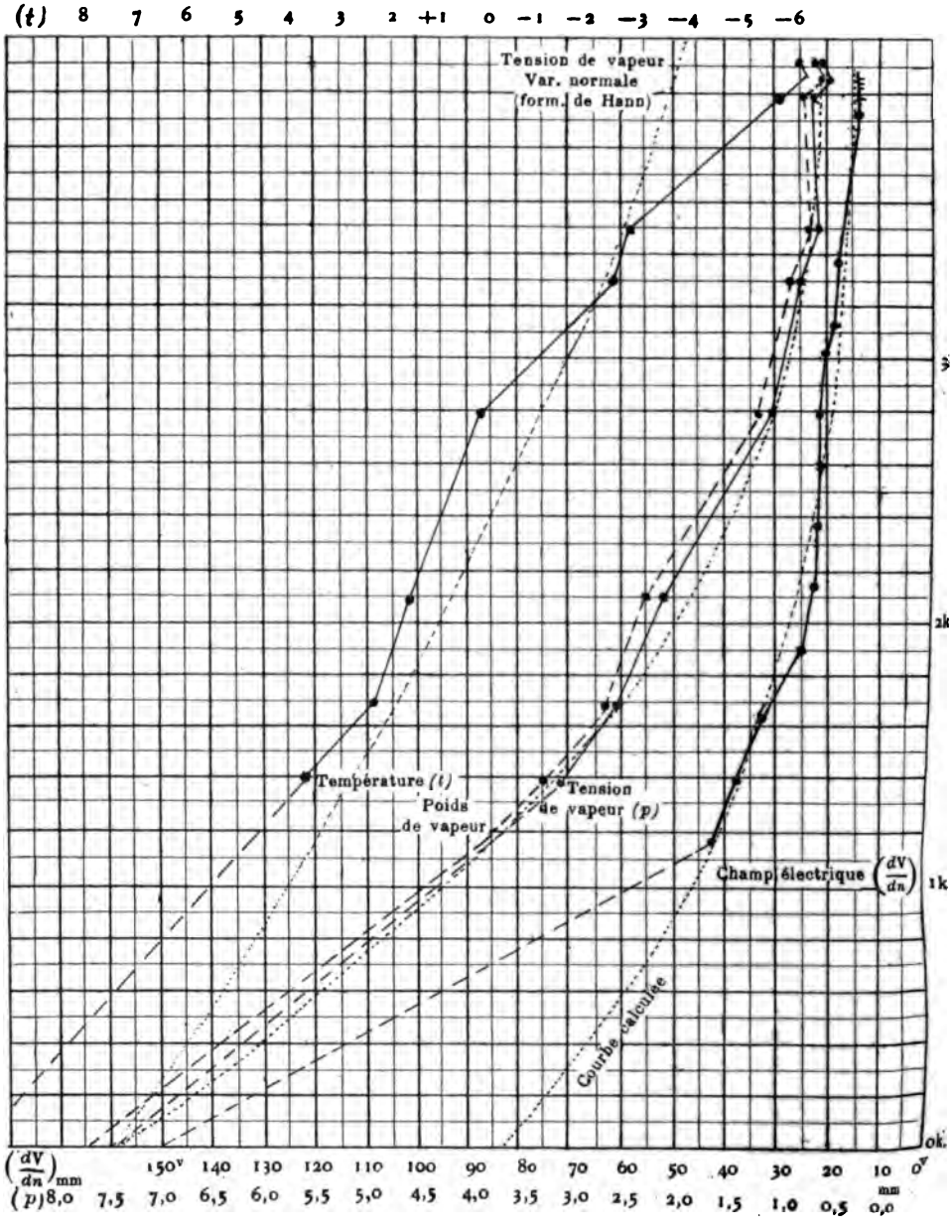
* On peut, comme on le voit, considérer à peu près indifféremment la variation de la tension ou du poids de vapeur.

Les observations recueillies sur le sol montrent que les éléments météorologiques y ont peu varié pendant la durée des mesures. Le baromètre était à 768 et en hausse, le vent N.N.E. assez fort et l'on peut adopter pour la température, l'humidité relative et absolue sur le sol, les valeurs respectives : + 13°, 70 % et $7^{mm},5$.

219. La tension de vapeur se représente par la formule suivante analogue à celle de Hann :

$$p = 7,5\ (1 - 0,501\ h + 0,0677\ h^2)\ ;\ (h \text{ en } km).$$

Calculée au moyen des nombres du tableau, par la méthode des moindres carrés, cette formule fournit des résidus élevés dans les hauteurs voisines de 1500 à 2100 mètres. Le manque de mesures entre le sol et 1400 mètres ne permet pas de certifier que cette formule représente bien la variation générale à l'époque des observations. Néanmoins, on ne peut douter que les résidus élevés correspondent à une anomalie réelle, manifeste à première vue, sans le secours même de la courbe calculée.



Pl. IV. — Ascension du 11 septembre 1897 :
Distribution verticale de la température, de la tension de vapeur et du champ électrique

Cette considération me dispense de représenter les autres éléments par le calcul. Il suffit de faire les tracés par points des variations observées et de les rapprocher sur la même planche (voy. pl. IV ; j'y ai joint, en ligne ponctuée les courbes calculées de la tension de vapeur et du champ), pour montrer la réalité d'un trouble atmosphérique autour de 2000 mètres.

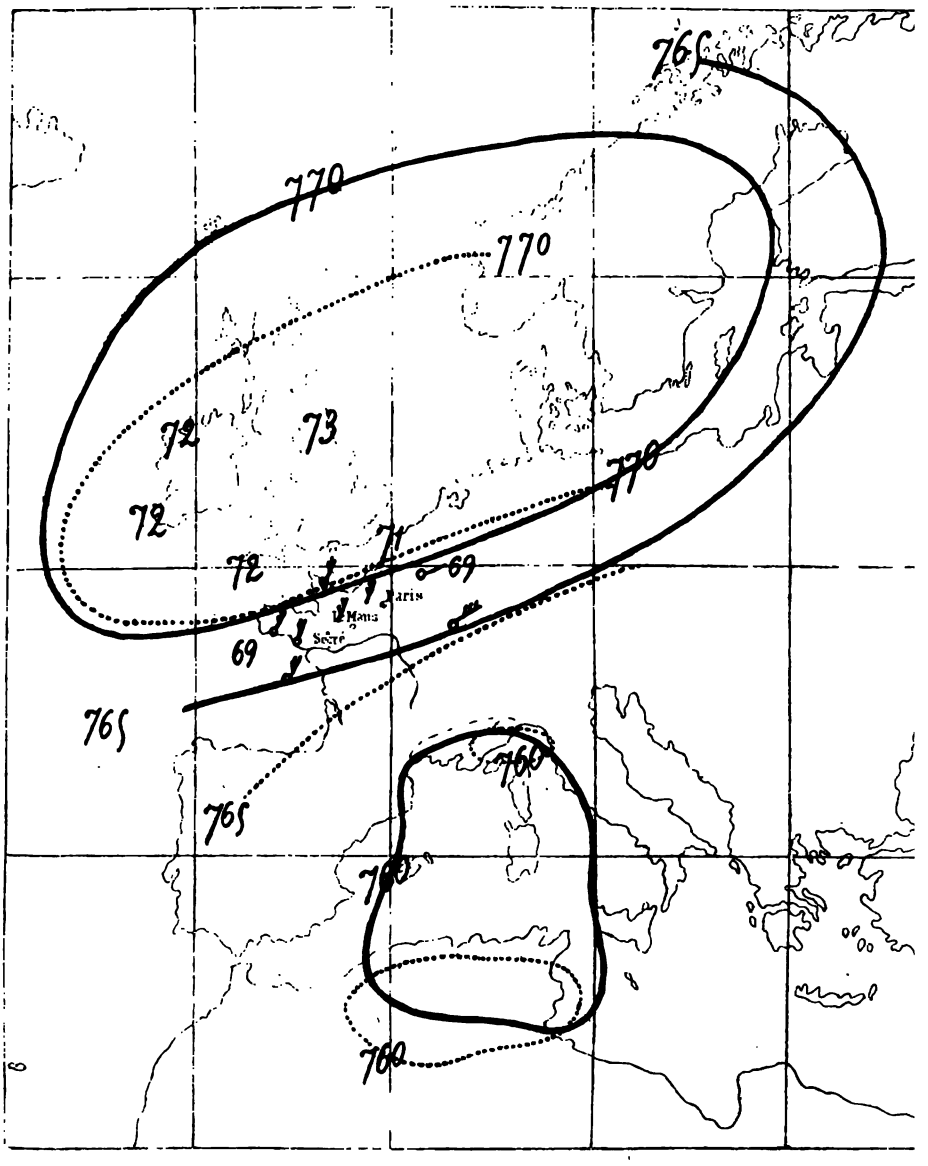
Pour mettre en évidence cet état particulier de l'atmosphère et caractériser l'anomalie relative que présentait cet état dans les couches voisines de 2000 mètres, j'ai tracé en outre, pl. IV, la courbe de distribution normale de la vapeur d'eau, d'après la formule de Hann et en partant de la valeur mesurée de la tension de vapeur au niveau du sol (voisin du niveau de la mer).

220. On voit que, d'une façon générale, l'atmosphère subissait, depuis le sol jusqu'à 4000 mètres, un refroidissement plus lent et un dessèchement plus rapide dans la hauteur que ne l'eût comporté une situation normale.

Le dessèchement anormal était à peu près totalement opéré dans les couches inférieures entre le sol et 1700 mètres. De 1700 mètres à 3500 mètres, la diminution du poids de vapeur d'eau était normale, dans la moyenne. Et enfin, de 3500 à 4000, la diminution était au contraire affaiblie, de telle sorte que la tension de vapeur avait vraisemblablement une valeur normale dans les couches supérieures.

C'est également un retour vers la normale qui tentait de s'opérer entre 1500 et 2100 mètres, et qui caractérise par un accroissement relatif, suivi d'un décroissement du poids de vapeur d'eau, le trouble relatif de l'atmosphère à ce niveau.

Ce mouvement de la vapeur d'eau était accompagné d'une élévation relative de température telle, d'ailleurs, que l'humidité relative continuait sans trouble sa marche antérieure jusqu'à 2100 mètres. Elle décroissait alors rapidement avec le poids de vapeur jusque vers 2800 mètres, où elle reprenait



Isobares en ligne pleine ——— situation à 7 heures du matin.
— pointillé -------- — 6 heures du soir.
Trajectoire du voyage: Paris-Le-Mans-Segré.

Pl. V. — Carte des isobares (Samedi, 11 septembre 1897).

sa marche antérieure, avec quelques alternatives à peu près correspondantes à celles du poids de vapeur, pour augmenter de nouveau par une marche inverse de la température entre 3500 mètres et 4000 mètres, altitude à partir de laquelle tous les éléments tendaient à reprendre leur valeur normale par rapport à la surface de la terre.

221. On imagine nettement, d'après cette analyse (et d'après ce que l'on sait d'autre part sur la physique des fluides), l'atmosphère comme étant, au moment considéré, animée d'un mouvement descendant inférieur qui interférait avec un mouvement descendant supérieur autour de 2800 mètres, en donnant lieu à des ondulations, c'est-à-dire à des alternatives de descente et de montée, soit de compression et de dilatation. Les poussières atmosphériques obéissant aux mouvements de l'air étaient par le mouvement inférieur, accumulées dans les couches voisines du sol, en même temps que la vapeur y subissait une compression : ce qui donnait lieu à une condensation brumeuse que le renouvellement horizontal rapide des couches d'air tendait à disperser avec le produit de l'évaporation.

222. La distribution générale des pressions représentée dans la carte ci-jointe[1] (pl. V) rend d'ailleurs compte de ces mouvements.

La région parcourue se trouvait sur la pente rapide d'une aire de hautes pressions d'où l'air s'écoulait pour combler sur place une dépression qui existait sur le golfe de Gênes.

Le vent, N.-E. à terre, prenait une composante E. de plus en plus accusée, en même temps que la composante normale descendante, maxima à une hauteur moyenne, diminuait dans les altitudes élevées où elle changeait même de sens[2].

[1] *Bulletin du B. C. M.*, 11 septembre 1897 ; voir aussi le **12**.

[2] C'est à ce courant descendant que l'on doit attribuer les difficultés que le ballon éprouvait à s'élever, et que j'ai signalées. A 4000 mètres, des papiers légers dits « ascensionnels « s'élevaient au contraire, le baromètre restant fixe.

223. L'état de l'atmosphère présentant des particularités bien déterminées relativement à la variation verticale de l'électricité et de l'humidité de l'air, on peut chercher comment l'hypothèse généralement admise d'une relation entre ces deux phénomènes s'adapte à cette variation particulière.

DISCUSSION ET CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Relation entre la distribution de la vapeur d'eau et la distribution des masses électriques dans l'atmosphère.

224. Je puis, comme je l'ai dit, considérer à part la variation du champ dans la hauteur et négliger d'abord la valeur observée sur le sol.

Cette variation assigne aux masses électriques de l'atmosphère le signe positif, c'est-à-dire ρ est positif dans la formule

$$\frac{d^2V}{dh^2} = -4\pi\rho.$$

En intégrant, on met le champ observé en relation avec la densité ρ par la formule

$$\frac{dV}{dh} = -4\pi\int \rho dh + B$$

où B est la valeur de $\frac{dV}{dh}$ pour $h = o$, c'est-à-dire sur le sol.

Pour donner à la variation de $\frac{dV}{dh}$ une signification théorique, prenons maintenant (suivant les idées d'Exner, mais avec un signe différent), ρ comme proportionnel au poids dans l'unité de volume ou à la tension p de la vapeur, en tout point de l'atmosphère, suivant l'équation $\rho = cp$, c étant positif.

Or, p a été déterminé précédemment par la formule :

$$p = p_0(1 - \alpha h + \beta h^2).$$

On a donc (en exprimant h en mètres, et les valeurs de α et β en conséquence) :

$$\frac{dV}{dh} = B - 4\pi c p_0 \int (1 - \alpha h + \beta h^2)\, dh,$$

soit :

$$\frac{dV}{dh} = B - 4\pi c p_0 h \left(1 - \frac{\alpha}{2} h + \frac{\beta}{3} h^2\right).$$

Si l'on porte dans cette formule les valeurs de p_0, α, β, déterminées précédemment, et que l'on calcule, au moyen des observations, par la méthode des moindres carrés, les valeurs les plus probables de c et de B, on obtient

$$c = 0{,}000506; \quad B = +83{,}4 \frac{\text{v.}}{\text{m.}}$$

et l'observation se représente par la courbe en pointillé de la planche IV avec des résidus correspondants aux anomalies signalées vers 2000 mètres d'altitude[1].

Cette représentation est, comme on le voit, parfaitement satisfaisante; au moins quant à la couche d'atmosphère parcourue entre 1100 et 4000 mètres, c'est-à-dire au-dessus de la limite apparente des brumes inférieures et au-dessous de la région des cristaux de glace (voy. note du § 226).

Elle signifie que, du moins dans ces limites, *l'intensité du champ diminuant quand la hauteur augmente*, *la diminution*

[1] La variation de la tension de vapeur est représentée par la formule

$$p = 7{,}5\ (1 - 0{,}000501\ h + 0{,}0000000677\ h^2);\ h \text{ en mètres.}$$

Le poids de vapeur calculé par une formule analogue donne :

$$q = 7{,}65\ (1 - 0{,}000486\ h + 0{,}0000000639\ h^2);\ h \text{ en mètres.}$$

Tandis que la tension de vapeur conduit aux valeurs indiquées pour c et B, le poids de vapeur donne pour ces mêmes quantités :

$$c = 0{,}000467,\ B = +80{,}5.$$

La variation du champ avec la hauteur conduit à la même représentation avec les résidus (obs.-calc.) suivants (voy. tabl. VI) :

$$+0{,}3 + 1{,}5 + 0{,}1 - 2{,}7 - 2{,}4 - 1{,}3 + 1{,}0 + 1{,}8 + 2{,}0 + 1{,}2 + 2{,}4$$
$$- 1{,}1 - 0{,}9 - 0{,}6 - 0{,}7 - 0{,}4$$

par unité de hauteur est uniformément proportionnelle à la tension moyenne de la vapeur au niveau moyen considéré ou au poids de vapeur d'eau contenu dans l'unité de volume à ce niveau.

225. *Anomalie apparente observée dans les couches moyennes.* — En considérant les courbes de la planche IV, on voit, ainsi que je l'ai annoncé, qu'elles présentent autour de 2000 mètres, des singularités correspondantes. Le sens des variations relatives de ces éléments est tel qu'à une augmentation relative de la température et particulièrement du poids ou de la tension de la vapeur d'eau correspond une diminution relative du champ et inversement.

Ces éléments manifestent donc, dans leurs variations relatives, une relation de sens opposé à celle qu'ils ont par le sens — commun à tous — de leurs variations générales avec la hauteur.

Cela résulte de l'expression même de la relation générale énoncée ci-dessus, en considérant qu'en tout point l'intensité du champ dépend de la somme positive des masses situées dans l'atmosphère au-dessus de ce point.

En effet, l'expression théorique (dans laquelle c est positif),

$$\frac{d^2V}{dh^2} = -4\pi\rho = -4\pi cp = -kp$$

devient — avec l'unité (mètre) adoptée dans la pratique des mesures :

$$\left(\frac{\Delta V}{\Delta h}\right)_h - \left(\frac{\Delta V}{\Delta h}\right)_{h+1} = kp, \text{ soit : } F_h - F_{h+1} = kp.$$

Suivant alors qu'en s'élevant de h à $(h+1)$, on laisse au-dessous une plus ou moins grande partie des masses positives, soit une plus ou moins grande proportion de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, on doit trouver pour F_{h+1} une

valeur plus ou moins faible, mais toujours inférieure à F_h; du moins jusqu'à la limite des masses positives.

Cette anomalie apparente confirme donc la relation générale. Elle fortifie la présomption d'électrisation positive de la vapeur d'eau qui assigne au champ que nous mesurons une limite supérieure déterminée.

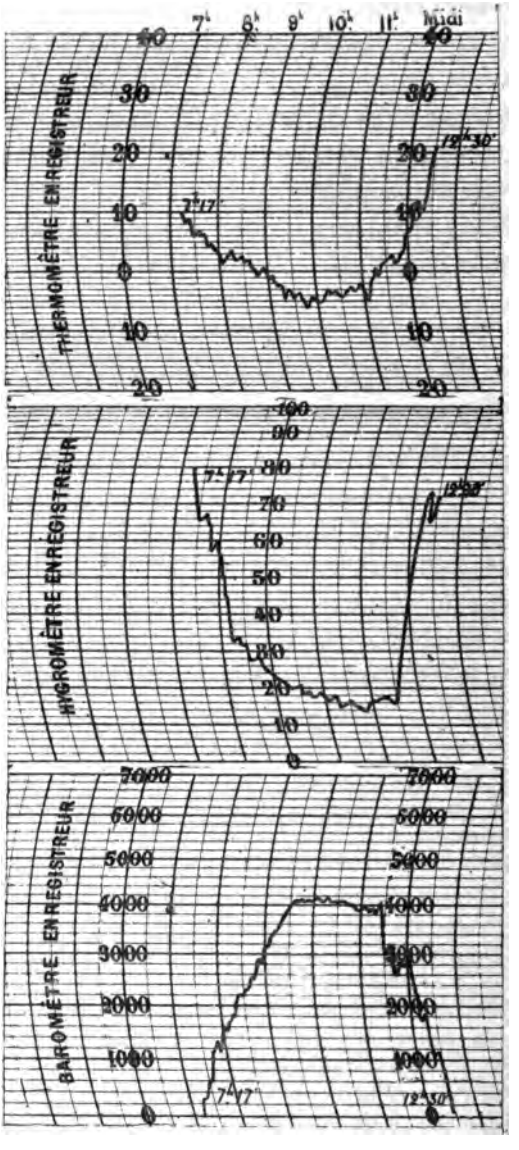
226. *Electrisation positive de la vapeur d'eau atmosphérique. — Limite du champ.* — La relation que j'ai établie montre que *tout se passe comme si les masses électriques positives comprises dans l'atmosphère au-dessus d'une couche basse de 1 kilomètre d'épaisseur, étaient exclusivement répandues dans la vapeur d'eau et en quantité proportionnelle au poids de cette vapeur dans l'unité de volume.*

Quoique la relation n'ait pas été étendue par l'expérience au delà de 4 kilomètres, et que la limite du champ n'ait pas été atteinte, on pourrait présumer que cette limite correspond à celle de l'atmosphère humide.

La formule qui donne la distribution de la vapeur d'eau ne peut pas être extrapolée : elle ne conduit pas à une valeur réelle. Mais on doit en outre s'attendre à une anomalie provenant de la présence de cristaux de glace[1] dans les hautes régions.

[1] Il existe des cristaux de glace plus ou moins disséminés dans les hautes régions très froides de l'atmosphère, alors même que le ciel paraît parfaitement clair. Ce fait est prouvé par les observations de Tissandier (Résumé des observations faites dans le cours de vingt-deux ascensions aérostatiques. *Atlas météorol. de l'Observatoire de Paris*, tome VIII, p. J 5 et 6, 1876) ; il est discuté et admis par le Dr L. Sohncke *(Der Ursprung der Gevitter-Elektricität und der gewöhnlichen Elektricität der Atmosphäre*, Iena, 1885, p. 58) et reconnu par M. Mascart, en raison de ses conséquences optiques *(Traité d'Optique*, t. III, ch. xx, p. 472). Dans les hivers très rigoureux on a observé des paillettes de glace flottant dans l'air au voisinage du sol, sous un ciel sans nuages. Ce phénomène a été noté à l'Observatoire de Lyon dans l'hiver 1879-80, par un temps très froid et très sec. D'après M. Mascart, ce sont encore des prismes hexagonaux très développés dans le sens de l'axe.

Les cirrus de la haute atmosphère apparaissent d'ailleurs comme le résultat de l'agglomération de semblables cristaux de glace ou de neige sèche sous l'action des courants d'air rapides qui règnent dans ces régions principalement à l'approche des bourrasques.



Courbes de l'enregistreur de MM. Hermite et Besançon obtenues au cours de l'ascension du *Touring-Club*, le 11 septembre 1897.

TABLEAU VII (11 Septembre 1897.)

Heure T. M. P.	Altitude au-dessus du sol de Paris	Temp.	(Th. m.)	Tension de vapeur	Poids* de vapeur dans 1 mc	Humidité relative	A PARIS (Tour St-Jacques) Temp.	Tension vapeur	Hum.
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
h m	m			mm	g	%		mm	%
7.10	1	+10°4	(+ 8°8)	7,50	7,65	80	+10°5	7,53	81
8. 6	1400	+ 3,7	(+ 0,4)	3,07	3,21	51	12,0	7,73	74
8.15	1690	+ 2,4	(— 1,4)	2,52	2,65	46	12,4	7,72	72
8.30	2100	+ 1,7	(— 2,5)	2,11	2,25	41	12,6	7,59	70
8.57	2780	+ 0,2	(— 5,3)	1,02	1,08	22	13,0	7,41	67
9.11	3300	— 2,4	(— 7,6)	0,74	0,79	19	13,3	7,53	66
9.18	3500	— 2,7	(— 8,2)	0,57	0,61	15	13,4	7,47	65
9.46	3980	— 5,7	(—10,2)	0,63	0,68	21	13,7	7,41	63
9.50	4050	— 6,1	(—10,8)	0,48	0,52	17	13,8	7,35	62
9.59	4100	— 6,0	(—10,7)	0,51	0,55	18	14,0	7,35	62

* On peut, comme on le voit, considérer à peu près indifféremment la variation de la tension ou du poids de vapeur.

Les observations recueillies sur le sol montrent que les éléments météorologiques y ont peu varié pendant la durée des mesures. Le baromètre était à 768 et en hausse, le vent N.N.E. assez fort et l'on peut adopter pour la température, l'humidité relative et absolue sur le sol, les valeurs respectives : + 13°, 70 % et $7^{mm},5$.

219. La tension de vapeur se représente par la formule suivante analogue à celle de Hann :

$$p = 7,5\ (1 - 0,501\ h + 0,0677\ h^2)\ ;\ (h \text{ en } km).$$

Calculée au moyen des nombres du tableau, par la méthode des moindres carrés, cette formule fournit des résidus élevés dans les hauteurs voisines de 1500 à 2100 mètres. Le manque de mesures entre le sol et 1400 mètres ne permet pas de certifier que cette formule représente bien la variation générale à l'époque des observations. Néanmoins, on ne peut douter que les résidus élevés correspondent à une anomalie réelle, manifeste à première vue, sans le secours même de la courbe calculée.

dans les deux cas à un état brumeux très remarquable des couches voisines du sol.

232. Etant admis que la vapeur d'eau de l'atmosphère est électrisée en propre et préalablement, il est hors de doute que l'eau de condensation de cette vapeur est elle-même électrisée. Et cette condensation rassemble dans un volume 100.000 fois plus petit, en moyenne, les masses électriques répandues sur la vapeur dans un mètre cube d'air[1].

Or la vapeur existe à l'état condensé dans les brouillards comme dans les nuages, en gouttelettes pleines ou creuses; elle existe encore plus généralement condensée à l'état de brume sur les particules solides de l'atmosphère inférieure (comme cela résulte des travaux de Kiessling[2], d'Aitken[3] et d'autres physiciens, parmi lesquels MM. Elster et Geitel qui ont déjà considéré ce fait pour les conclusions de leurs mesures actino-électriques).

Cette eau non dissoute dans l'air ne se révèle d'ailleurs ni à l'hygromètre ni au psychromètre, qui marquent souvent dans une brume épaisse un état hygrométrique très éloigné de la saturation.

233. L'anomalie positive des couches basses se présente ainsi comme une conséquence même de la relation qu'elle masque, en considérant que l'unité de volume d'air de ces couches brumeuses contenait et contient généralement non seulement les masses électriques normales de la vapeur *que l'on mesure*, mais en outre les masses électriques beaucoup

[1] Je ne considère pas la proposition réciproque, évidente pour la goutte d'eau isolée dans l'atmosphère, comme l'affirme Lord Kelvin (On the electr. of air, *Proc. of. R. S.*, 1894), mais nullement démontrée pour une surface constante d'eau calme.

[2] J. Kiessling, Ueber den Einfluss kuenstlich erzeugter Nebel auf direktes Sonnenlicht. (*Met. Zeitschr.*, Berlin, 1884; p. 117-126), cité par Elster et Geitel (*loc. cit.*)

[3] Aitken, On dust, fogs and clouds (*Ciel et Terre*, Brux., 1881-82, p. 153-154, *Proc. of R. S.*, Edimb.; 1881-83, p. 14-18, 122-126).

plus condensées des particules de brume et de brouillard *que l'on ne mesure pas.*

234. Je n'ai fait, le 11 septembre, aucune mesure qui me permette de justifier expérimentalement cette explication. Il eût fallu disposer d'un hygromètre chimique, assurant, en divers points de la couche de brouillard, une dessiccation parfaite de l'air. Néanmoins, on peut, en s'appuyant sur les moyennes de semblables mesures, se rendre compte approximativement de son exactitude par le calcul suivant :

J'évalue à 600 mètres la hauteur limite de la couche de brume : en portant cette valeur de h dans l'expression précédente de M, on a :

$$5{,}334 = \rho'.600 \text{; d'où } \rho' = 0{,}00889.$$

La valeur moyenne de la densité correspondante de la vapeur était, en prenant le poids moyen $= 6^g{,}5$:

$$\rho = 0{,}000506 \times 6{,}5 = 0{,}00329.$$

Les quantités d'eau par mètre cube devant être dans le même rapport que les quantités correspondantes de masses électriques, on a :

$$\frac{p'}{p} = \frac{\rho'}{\rho} = 2{,}7 \text{ d'où } p' = 17^g{,}6.$$

Le poids d'eau condensée sur les particules du brouillard serait ainsi évalué à $17^g{,}6$ par mètre cube ; alors que l'air saturé sans condensation en eût contenu $8^g{,}7$ dans le même volume.

Ce poids d'eau correspond à 39000 gouttelettes de $0^{mm}{,}01$ de diamètre par centimètre cube : ce qui caractérise un brouillard léger en comparaison du brouillard proprement dit, renfermant des gouttelettes de $0^{mm}{,}01$ à $0^{mm}{,}03$, en nombre variant de 30.000 à 150.000, ainsi que l'établissent les mesures de Dines, d'Assmann d'une part et d'Aitken d'autre part.

Tel est le résultat très vraisemblable et très probable auquel on est conduit en considérant que *l'anomalie positive des couches basses, par rapport à la relation établie entre la densité électrique positive et le poids de vapeur d'eau dans l'unité de volume, doit être attribuée aux particules condensées de la brume et du brouillard de ces couches.*

Conséquences probantes.

235. A poids égal de vapeur d'eau, l'anomalie positive doit donc être d'autant plus grande que la brume est plus dense, c'est-à-dire que l'atmosphère des couches basses est plus opaque et contient plus d'éléments, devant être considérés comme actifs, qui échappent à la mesure psychrométrique.

C'est en effet ce qui résulte des mesures suivantes de MM. Elster et Geitel[1], correspondantes à la même tension moyenne de vapeur ($4^{mm},0$ à $4^{mm},9$). La visibilité d'un point remarquable de l'horizon s'étendant à n kilomètres, $\frac{1}{n}$ est pris comme mesure de l'opacité de l'air :

Opacité $\frac{1}{n}$	$\frac{dV}{dn}$ moy. du jour moy.	nombre de jours
—	— v.	—
1,49	378	6
0,57	298	3
0,19	122	5
0,06	141	4

MM. Elster et Geitel ont déduit, d'une façon générale, de leurs mesures, que « dans les plus belles et les plus sèches journées de l'hiver, les potentiels les plus élevés correspondent toujours à la plus grande opacité de l'atmosphère ». Ils n'ont

[1] Elster et Geitel, Beobachtungen des atmosphärischen Potentialgefälles und der ultravioletten Sonnenstrahlung (*Sitzungsberichte der k. Akad. Wien*, t. CI, p. 825, 1892.)

pas pu faire de mesures au moyen du compte-poussières d'Aitken, mais il ne leur paraît pas douteux, d'après d'autres considérations, que l'augmentation de l'opacité correspond à un accroissement du nombre des particules solides de l'atmosphère et, par suite, à une plus forte proportion de vapeur condensée.

236. Cette *humidité brumeuse de l'air* est différente de l'humidité relative et de l'humidité absolue. Elle est fonction de l'humidité relative et de la quantité de poussières contenue dans l'unité de volume. On peut même dire qu'elle est fonction de l'humidité relative et de la pression si l'on considère, suivant Aitken[1], que la densité des poussières augmente avec la pression barométrique dans les couches basses.

Toutefois, le phénomène de cette condensation brumeuse dépend de trop de circonstances pour qu'il puisse être établi une relation exacte ; d'autant plus que la quantité des poussières, qui joue cependant le rôle le plus important, comme le reconnaît M. Mascart[2], n'est généralement pas déterminée.

Le phénomène tend d'ailleurs à s'entretenir par lui-même ; car les particules, étant électrisées, donnent lieu entre elles à des décharges et, par suite, à une ozonisation de l'air qui lui conserve la faculté de provoquer des buées[3].

237. Quoi qu'il en soit, l'observation directe des troubles de la transparence de l'air des couches basses (que la situation avantageuse de l'Observatoire, sur une colline isolée, m'a permis de faire) établit que les maxima de cette humidité brumeuse correspondent à l'hiver et à l'automne, et aux moments qui suivent le lever et le coucher du soleil. Et c'est à cette humidité, à cette brume que se rapportent, au moins

[1] Aitken, Les poussières de l'air et leurs rapports météorologiques (*Trans. and Proc. of the R. Soc. of Edinburgh.*, et Lancaster, *Ciel et Terre*, p. 177, 1892-93).

[2] Mascart, *Traité d'Optique*, t. III, ch. XIX, p. 404 et suiv.

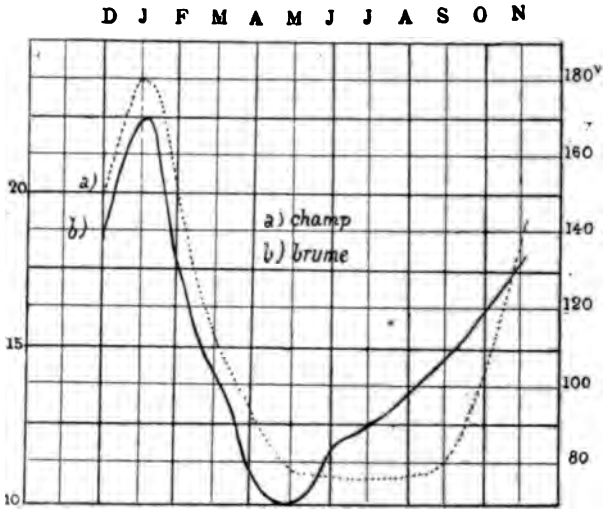
[3] Mascart, *loc. cit.*, p. 405.

en partie, les maxima annuels et diurnes élevés de l'intensité du champ à la surface de la terre dans nos climats.

Ainsi, en faisant la somme des jours de brouillard et de brume dans chaque mois moyen, d'après le tableau dressé par M. André[1] pour la période de dix ans, à l'Observatoire de Lyon, on trouve les nombres suivants qui représentent, pour chaque mois, la fréquence de ces formations :

18,7 22,7 17,2 14,0 10,5 10,0 11,8 12,5 13,7 14,7 16,2 18,0

Si l'on évaluait plus exactement la durée diurne et la densité de ces condensations, on trouverait que les nombres corres-



pondants à la période d'été doivent être diminués en raison de la limpidité relative des après-midi dans cette période et la courbe ci-dessus, construite avec les nombres précédents, se rapprocherait d'une façon remarquable de celle de la variation annuelle du champ.

[1] Ch. André, *loc. cit.*, p. 89.

Discussion.

238. Il est donc bien certain que toute tentative pour mettre en relation le champ et l'humidité relative ou absolue au voisinage du sol doit aboutir à des contradictions ou tout au moins à des anomalies inexplicables, si l'on ne tient pas compte de cette humidité brumeuse. C'est le cas pour la relation de M. Exner, ainsi que l'ont montré les observations de MM. Elster et Geitel. (Voy. note du § 197.)

D'après la relation que j'ai établie dans la hauteur entre le champ et la tension de vapeur, ces deux quantités, mesurées sur le sol, devraient augmenter simultanément, puisqu'elles représentent normalement, l'une la somme des masses positives, l'autre la quantité de vapeur proportionnelle contenues dans l'épaisseur de l'atmosphère.

En hiver, le champ devrait donc être plus faible qu'en été. Et s'il n'en est pas ainsi, il semblerait maintenant que ce soit à la grande quantité de vapeur condensée en hiver sur les brumes inférieures et qui échappe à la mesure psychrométrique, que l'on puisse l'attribuer au moins en partie.

239. La considération de la vapeur condensée des brumes basses ne suffit toutefois pas à expliquer la variation annuelle *dans la supposition d'un coefficient d'électrisation constant de la molécule d'eau.*

En admettant que cette eau globulaire s'ajoute à celle que l'on mesure pour représenter la quantité totale d'eau contenue dans l'atmosphère, il faudrait que cette quantité totale fût plus grande en hiver qu'en été.

Or, il n'en est pas ainsi apparemment, si l'on considère d'une part les quantités totales de pluie correspondantes aux deux périodes d'été et d'hiver (à Lyon[1], par exemple, on a respectivement $391^{mm}8$ et $321^{mm}8$) ; et si l'on considère, d'autre part,

[1] Ch. André, *loc. cit.*, p. 54.

que toutes les causes de production de vapeur d'eau sont ralenties en hiver. De plus, « l'apport dans l'atmosphère de l'eau à l'état de vapeur, par les grands courants atmosphériques qui nous amènent les cyclones, dépend évidemment presque tout entier de la direction du vent; les vents d'entre sud et ouest étant généralement fort humides, tandis que ceux d'entre nord et est sont, au contraire, généralement secs. En se rapportant à la variation annuelle de la direction du vent, on conclurait que cet apport serait minimum en février, mars et avril, et maximum en juin, juillet et août[1]. »

Mais si l'atmosphère de nos régions contient, en hiver, une moindre quantité d'eau à l'état gazeux et liquide qu'en été, elle doit renfermer, dans ses couches basses, plus de poussières minérales ou autres et, dans ses couches moyennes et élevées, plus de cristaux de glace que dans cette dernière saison.

C'est ce qui semble, en effet, résulter de l'augmentation des combustions dans nos foyers jointe à l'état particulier de l'air, dépendant du vent dominant, de la pression et de la température, enfin du régime anticyclonique, de la saison d'hiver.

240. C'est donc sur ces deux éléments que l'on devrait chercher l'excédent de masses électriques positives nécessaire à l'explication des phénomènes.

Il s'en suivrait que *la brume et le brouillard doivent être considérés comme exerçant, par l'ensemble de leurs éléments liquides et solides, l'influence positive prépondérante des couches basses à laquelle sont dues, en majeure partie, les variations du champ à la surface de la terre.*

Les cristaux de glace comme aussi vraisemblablement les particules minérales (sur lesquelles se fait ou par lesquelles se facilite la condensation dans les hautes régions) doivent, pour la même raison, *être considérés comme électrisés positivement,* et donnant lieu, par suite, dans ces régions à une

[1] Ch. André, *loc. cit.*, p 69.

anomalie positive à la loi de distribution verticale des masses positives de l'atmosphère.

Telles sont les conséquences auxquelles on est conduit en attribuant à l'eau atmosphérique une électrisation positive spécifique, déterminée par le coefficient constant d'électrisation de sa vapeur, suivant l'équation $\rho = cp$.

Conclusion.

241. Ces conséquences ne comportent pas, tout d'abord, une relation assez précise pour justifier l'hypothèse d'une polarité propre de la vapeur d'eau atmosphérique, et pour donner lieu à rechercher expérimentalement l'origine de cette polarité.

L'affaiblissement du champ dans les régions équatoriales et dans la période d'été, correspondant à une augmentation du poids de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, se présente comme une contradiction à l'affaiblissement reconnu avec la hauteur. Cette contradiction n'est pas complètement levée en supposant que les particules solides se chargent, au contact, d'une partie de l'électricité propre de la vapeur d'eau condensée.

On a trouvé, en outre, qu'au cours d'une journée les couches inférieures de l'atmosphère peuvent présenter un champ uniforme et même croissant, c'est-à-dire que tout se passe comme si l'électrisation positive supposée de la vapeur était neutralisée par des masses négatives émises vraisemblablement par le sol, et donnant lieu à une anomalie négative inverse de l'anomalie positive des couches basses.

C'est à la prépondérance de ce phénomène que l'on pourrait attribuer l'affaiblissement sur le sol dans la période d'été. On serait ainsi conduit à reconnaître que l'action solaire, qui préside à l'augmentation générale de la tension de la vapeur d'eau de l'atmosphère dans les régions équatoriales, et en été sous toutes les latitudes, préside en même temps à la dispersion de masses négatives du sol dans l'atmosphère inférieure.

En raison même de ce phénomène, il ne paraît pas qu'on doive considérer la molécule de vapeur comme possédant dans l'atmosphère une charge spécifique invariable ; il paraît tout au moins difficile de déterminer avec certitude le coefficient c dont la valeur constante justifierait cette hypothèse, en même temps qu'elle permettrait de conclure avec une forte probabilité l'origine de l'électrisation de la vapeur, et la nature des expériences à instituer pour mettre cette électrisation en évidence.

La question ne pourrait être résolue définitivement que par l'exploration électrique de l'atmosphère, poursuivie à de grandes hauteurs sous des latitudes très différentes.

CHAPITRE III

THÉORIE PROPOSÉE

HYPOTHÈSE NOUVELLE CONCERNANT L'ORIGINE DES MASSES POSITIVES DE L'ATMOSPHÈRE

242. En considérant que, par le fait de la conductibilité qu'elle acquiert en se condensant, l'eau atmosphérique peut emprunter une charge électrique à un élément quelconque de l'air, on peut vraisemblablement attribuer à quelque élément variable autre que la vapeur d'eau le rôle de véhicule originel des masses positives de l'atmosphère.

La variation verticale que j'ai déduite de mes mesures en ballon me conduit, par son caractère même, à penser que ce rôle est dévolu à l'*acide carbonique*, dont la distribution s'accorde, a priori, avec celle des masses positives; surtout si l'on considère qu'en se dissolvant dans les gouttelettes de brouillard cet élément supposé électrisé y condenserait sa charge sur les particules liquides et solides des couches basses, pour produire l'excès positif attribuable à cette formation brumeuse (voy. les *Remarques* de la page 174).

Rien ne s'oppose a priori à ce que l'on considère le *champ* comme *résultant de l'électrisation négative de la surface terrestre et de l'électrisation positive équivalente de l'acide carbonique dégagé de la terre*, dans les diverses actions chimiques du sol et les dissociations des carbonates en dissolution dans les eaux de la mer.

On est certes plus fondé à admettre l'électrisation de l'acide

carbonique résultant d'une action chimique (combustion ou dissociation), qu'à imaginer avec Volta l'électrisation de la vapeur d'eau, produite par l'évaporation naturelle [1].

C'est une vue que je pourrais appuyer sur l'ancienne expérience de Pouillet [2], mais que, faute d'expérience personnelle décisive, je propose en attendant, à titre d'hypothèse en faveur de laquelle les faits suivants, et quelques autres relatifs aux perturbations, fournissent les plus fortes présomptions.

Conséquences probantes.

243. 1° L'acide carbonique étant un gaz constituant de l'air atmosphérique, les mouvements généraux de sa masse suivent les mouvements généraux de la masse de l'atmosphère. On trouve ainsi la raison de ce fait que les variations générales du champ sur le sol accompagnent les variations générales de la pression barométrique.

244. 2° Si l'on tient compte de ce fait [3]: que l'acide carbonique n'obéit à la loi de Mariotte qu'à partir de 1/3 d'atmosphère et au-dessous, à la température ordinaire ; que, pour des pressions plus fortes, le volume résultant est toujours plus petit que le volume calculé et que cette différence va en s'accentuant à mesure que la force élastique augmente ; — si l'on tient compte de ce résultat des mesures de Truchot [4], à savoir que la proportion d'acide carbonique diminue avec l'altitude, de telle sorte que, par exemple, on ait :

à 395	mètres	d'altitude	$\frac{3,13}{10000}$	d'acide carbonique
à 1446	—	—	$\frac{2,03}{10000}$	—
à 1884	—	—	$\frac{1,72}{10000}$	—

[1] Voy. Mascart, *Traité d'El. st.*, t. II, p. 526-534.
[2] Pouillet, *Ann. de chim. et de phys.*, t. XXXV, p. 405, 1827.
[3] Schützenberger, *Traité de chimie générale*, t. II, p. 478.
[4] Schützenberger, *loc. cit.*, p. 482.

— si l'on considère en outre que le brouillard, notamment le brouillard des villes (Roscoe et Arthur Mac Dougall, Angus Smith[1]) renferme une très forte proportion d'acide; on admettra comme extrêmement probable que la distribution verticale normale du poids d'acide carbonique contenu dans l'unité de volume est conforme à la distribution des masses électriques positives qui résulte de mes mesures en ballon.

245. 3° Les sources de production de l'acide carbonique, comme aussi les causes d'absorption (nutrition des plantes sous l'influence de la lumière, dissolution), résidant à la surface de la terre; c'est dans les couches basses de l'atmosphère que se produisent nécessairement les variations continues les plus importantes de la proportion de cet élément.

En raison même du mode de nutrition et de respiration des végétaux, il doit se produire, sous l'influence de la lumière, une oscillation constante de la proportion d'acide contenue dans les couches voisines du sol.

Les courbes d'enregistrement des variations continues du champ obtenues dans les diverses stations, à l'Observatoire de Lyon, à Perpignan, au Parc Saint-Maur et à la Tour Eiffel, manifestent en effet des oscillations assez rapides correspondantes à la période d'insolation et telles que leur amplitude relativement très faible au sommet de la Tour Eiffel, acquiert au voisinage du sol (à Saint-Genis-Laval, par exemple, voy. pl. VI) une valeur manifestement croissante avec l'intensité de la radiation et particulièrement au printemps et en été.

246. 4° Les analyses de l'air ont révélé, dans la proportion d'acide carbonique, des périodes diurne et annuelle, qui sont en parfaite conformité avec celles que présentent les variations du champ électrique sous les mêmes latitudes et dans les mêmes climats. Les influences locales et climatériques plaident également en faveur de cette hypothèse.

Voici, par exemple, quelques résultats des mesures faites

[1] Schutzenberger, *loc. cit.*; Henriet, *les Gaz de l'atmosphère*, p. 100.

par le Dr H. Puckner[1], à Munich. Au sommet et au pied d'une tour de 55 mètres, les valeurs moyennes sont (en dix-millièmes) :

Saison froide						Saison chaude					
55 mètres			5 mètres			55 mètres			5 mètres		
jour	nuit	moy.	jour	nuit	moy.	jour	nuit	moy.	jour	nuit	moy.
5,941	4,962	5,451	4,828	4,702	4,765	2,885	3,182	3,033	3,434	3,226	3,330

Les nombreuses recherches faites au Laboratoire physique d'agriculture, sur le champ d'expériences, au-dehors de la ville, montrent une période annuelle bien marquée :

10 mètres au-dessus du sol.

	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	An.
Jour. . .	5,353	4,364	3,685	4,028	3,307	3,487	2,900	2,998	3,396	3,542	4,568	4,860	3,874
Nuit. . .	5,063	4,402	3,780	3,962	3,745	3,585	2,909	3,518	3,981	3,876	4,493	4,569	3,990

Les expériences ont été faites dans trois couches, à 1 mètre, à 2 mètres et à 10 mètres du sol; on a toujours trouvé moins d'acide carbonique en été qu'en hiver.

D'après le Dr Puckner, la quantité d'acide carbonique est en général très variable, d'une année à l'autre, d'un mois à l'autre mois, et même d'un jour au suivant. Ces résultats sont d'ailleurs confirmés par Dumas et par M. Albert Lévy, à Montsouris.

C'est encore un caractère conforme à celui de l'électricité atmosphérique.

247. 5° D'après les observations de Thorpe[2], les variations de l'acide carbonique sont moins sensibles sur mer (océan Atlantique) que sur terre ; la proportion est un peu plus grande le jour que la nuit, et moindre en moyenne que sur les continents.

[1] Dr H. Puckner, *Ann. de la Soc. Mét. de France pr.* 1894, p. 296.
[2] Voy. Schützenberger, *loc. cit.*, p. 482.

Les mesures électriques faites par M. Fr. Exner[1] dans l'océan Indien, révèlent un caractère analogue pour la variation du champ à la surface des mers.

248. 6° De toutes les causes reconnues de production de l'acide carbonique aérien, aucune n'existe au-dessus de l'océan glacé des contrées polaires et vraisemblablement la proportion moyenne de cet élément doit être très faible dans l'air de ces régions. Le champ électrique y est à peu près nul et très peu variable normalement, ainsi que je l'ai rapporté plus haut (§ 191).

Dans les régions équatoriales, au contraire, les causes de production de l'acide carbonique : les combustions actives et lentes des matières carbonées, les combustions respiratoires animales et végétales, les putréfactions et fermentations, trouvent les meilleures conditions de leur développement. On sait en effet que la quantité d'acide carbonique émise par les feuilles dans l'obscurité augmente avec l'élévation de la température[2]. Mais, par contre, pendant le jour, sous la double influence de la lumière du soleil et des cellules vertes des feuilles, l'acide carbonique y est d'autant plus activement absorbé et décomposé.

Il doit en résulter une variation diurne importante de la proportion d'acide carbonique (variable en outre avec les conditions climatériques particulières si différentes sur le sol des contrées tropicales), ayant pour caractère essentiel une diminution graduelle considérable correspondant à la période d'insolation.

En concourant avec les variations de l'ensemble de la masse atmosphérique, ces actions doivent imprimer, dans l'hypothèse admise, leur caractère aux variations du champ.

C'est en effet ce que montrent les mesures normales, faites

[1] Fr. Exner, Beob. über atm. Electricität in den Tropen II (*Sitzungsberichte der Ak. Wien*, B. 99, 1890).

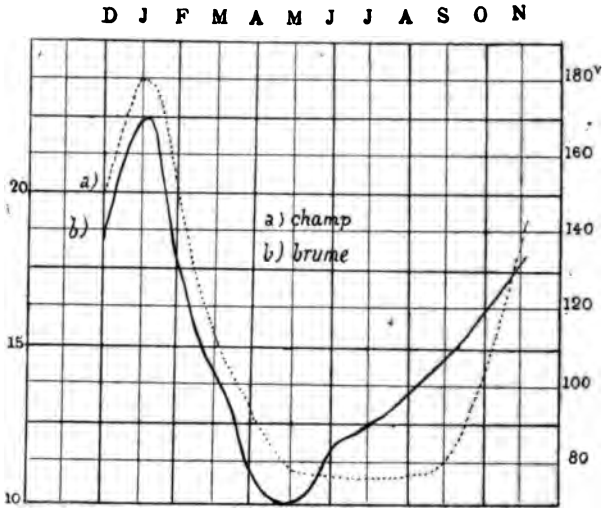
[2] P. Dehérain et Moissan, *Comptes rendus de l'Acad.*, t. LXXVIII, p. 1112.

en partie, les maxima annuels et diurnes élevés de l'intensité du champ à la surface de la terre dans nos climats.

Ainsi, en faisant la somme des jours de brouillard et de brume dans chaque mois moyen, d'après le tableau dressé par M. André[1] pour la période de dix ans, à l'Observatoire de Lyon, on trouve les nombres suivants qui représentent, pour chaque mois, la fréquence de ces formations :

18,7 22,7 17,2 14,0 10,5 10,0 11,8 12,5 13,7 14,7 16,2 18,0

Si l'on évaluait plus exactement la durée diurne et la densité de ces condensations, on trouverait que les nombres corres-



pondants à la période d'été doivent être diminués en raison de la limpidité relative des après-midi dans cette période et la courbe ci-dessus, construite avec les nombres précédents, se rapprocherait d'une façon remarquable de celle de la variation annuelle du champ.

[1] Ch. André, *loc. cit.*, p. 89.

Discussion.

238. Il est donc bien certain que toute tentative pour mettre en relation le champ et l'humidité relative ou absolue au voisinage du sol doit aboutir à des contradictions ou tout au moins à des anomalies inexplicables, si l'on ne tient pas compte de cette humidité brumeuse. C'est le cas pour la relation de M. Exner, ainsi que l'ont montré les observations de MM. Elster et Geitel. (Voy. note du § 197.)

D'après la relation que j'ai établie dans la hauteur entre le champ et la tension de vapeur, ces deux quantités, mesurées sur le sol, devraient augmenter simultanément, puisqu'elles représentent normalement, l'une la somme des masses positives, l'autre la quantité de vapeur proportionnelle contenues dans l'épaisseur de l'atmosphère.

En hiver, le champ devrait donc être plus faible qu'en été. Et s'il n'en est pas ainsi, il semblerait maintenant que ce soit à la grande quantité de vapeur condensée en hiver sur les brumes inférieures et qui échappe à la mesure psychrométrique, que l'on puisse l'attribuer au moins en partie.

239. La considération de la vapeur condensée des brumes basses ne suffit toutefois pas à expliquer la variation annuelle *dans la supposition d'un coefficient d'électrisation constant de la molécule d'eau.*

En admettant que cette eau globulaire s'ajoute à celle que l'on mesure pour représenter la quantité totale d'eau contenue dans l'atmosphère, il faudrait que cette quantité totale fût plus grande en hiver qu'en été.

Or, il n'en est pas ainsi apparemment, si l'on considère d'une part les quantités totales de pluie correspondantes aux deux périodes d'été et d'hiver (à Lyon[1], par exemple, on a respectivement $391^{mm}8$ et $321^{mm}8$) ; et si l'on considère, d'autre part,

[1] Ch. André, *loc. cit.*, p. 54.

l'atmosphère est due à la présence des poussières qui absorbent également les radiations lumineuses.

Enfin, les observations de Langley et de Crova et Houdaille montrant qu'il se produit un effet tout semblable relativement à l'énergie générale du rayonnement solaire, on peut considérer l'accroissement de l'intensité du rayonnement ultra-violet sur le sol comme correspondant, dans des moyennes, à un accroissement de l'énergie radiante qui décompose l'acide carbonique en présence des cellules vertes des végétaux ; soit à une diminution de la proportion d'acide contenue dans l'air.

La relation expérimentale précédente comporte donc la même interprétation que celle que j'ai annoncée plus haut (§ 235) entre l'intensité du champ et l'opacité visuelle de l'atmosphère. En tenant compte des remarques ci-après et de la dispersion négative envisagée plus loin, cette relation fournit, il me semble, un argument à peu près décisif en faveur de l'hypothèse que j'admets en conséquence de ce travail.

Remarques.

On ne peut pas prétendre que l'absorption de l'acide carbonique corresponde, dans tous les cas, à une désélectrisation proportionnelle de l'atmosphère. Étant admis que l'acide carbonique apporte dans l'air une charge positive, on ne peut douter que cette charge soit en grande partie captée par les poussières des couches inférieures de l'atmosphère et que ces poussières jouent, par le fait de leur constitution et par rapport au flux de gaz électrisé émané du sol, un rôle analogue à celui de la ouate et des treillis métalliques dans les filtres électriques *(electric receivers* ou *filters)* imaginés et employés par Lord Kelvin dans ses expériences sur l'électrisation et la désélectrisation des gaz (voy. *New. Science*, vol. II, p. 436).

Ce rôle des poussières a, d'ailleurs, été directement reconnu et caractérisé dans les expériences de Lénard *(Met. Zeitschr.*, p. 34, 1893) et celles de Lord Kelvin (voy. *Revue Générale des Sciences*, p. 396, 1895) sur l'électrisation de l'air. L'air poussiéreux s'électrise à un plus fort potentiel (Lord Kelvin) et se désélectrise plus lentement (Lénard et Lord Kelvin) que l'air pur.

Il résulte de ce fait une complication dans la distribution de l'électricité de l'atmosphère; complication qui se manifeste, généralement dans les couches basses, par une anomalie à toute relation entre la densité électrique et le poids du gaz (ou de la vapeur) supposé électrisé, contenu dans l'unité de volume.

Les poussières de l'air sont donc électrisées et normalement positives. Par

suite, si l'on admet avec Elster et Geitel *(loc. cit.)*, qu'elles constituent le principal élément absorbant du rayonnement ultra-violet dans les couches basses, on aura la raison pour laquelle, à hauteur égale du soleil, le champ est d'autant plus intense que le rayonnement ultra-violet qui parvient au sol est plus faible. Ce dernier fait s'accorde d'ailleurs aussi bien avec cette opinion de M. Mascart *(Traité d'Optique*, t. III, p. 377); à savoir que l'ozone ou l'air électrisé constitue le principal absorbant du rayonnement ultra-violet solaire dans les couches basses. Si l'on n'admet pas que les poussières agissent directement sur ce rayonnement, on concevra en effet qu'elles puissent agir par leur électrisation qui provoque nécessairement une ozonisation de l'air dans lequel elles sont accumulées.

251. Avant de formuler mes conclusions négatives en ce qui concerne les théories existantes de l'électricité atmosphérique, je signalerai une conséquence de l'électrisation négative de la surface terrestre qui ne peut être négligée et qui suffit à fournir, comme j'essayerai de le montrer, l'explication du changement de sens du champ près du sol, par beau temps, sans précipitation à distance.

ÉLECTRISATION NÉGATIVE DE L'ATMOSPHÈRE INFÉRIEURE

252. A la charge positive de l'atmosphère, correspond nécessairement, à la surface extérieure de la terre, une couche d'électricité négative équivalente.

Il en résulte non seulement une influence réciproque entre la terre et l'atmosphère, mais vraisemblablement aussi, des échanges électriques mutuels dans la couche de contact du milieu diélectrique avec le conducteur.

253. *Échanges de particules solides et liquides.* — Il est d'abord évident que les particules liquides et solides conductrices transportent, à la façon du plan d'épreuve, en passant du sol dans l'atmosphère et de l'atmosphère sur le sol, les charges qu'elles possédaient préalablement en propre ; et cela, au préjudice de la charge totale de l'un et de l'autre milieu différemment électrisés.

Ainsi agiront d'une part la pluie et les gouttelettes d'un brouillard très condensé pour décharger l'atmosphère sur le sol ; et, d'autre part, les poussières minérales soulevées des routes pour neutraliser l'atmosphère dans ses couches basses.

254. *Convection et déperdition.* — Outre ces actions indiscutables, mais accidentelles, il en est deux autres moins évidentes, mais pourtant expérimentales, dont l'importance et le caractère de généralité impliquent *la nécessité d'une cause d'électrisation au moins périodique, pour l'entretien du champ électrique de l'atmosphère.*

En premier lieu, la désélectrisation de l'air par le dépôt de ses poussières humides et par la condensation de la vapeur sur le sol ne peut pas être mise en doute.

Les récentes expériences de Lord Kelvin[1] sur l'électrisation et la désélectrisation de l'air chargé ou non de poussières mettent en évidence la perte de charge qui doit s'exercer de l'atmosphère sur le sol.

255. Toutefois, l'air étant assez faiblement électrisé dans l'unité de volume qui vient en contact avec le sol, il y a plutôt lieu d'envisager la déperdition inverse qui s'opère du sol dans l'atmosphère.

Dans ce sens, la première action dispersive de la charge du sol que l'on doive reconnaître, et que Lord Kelvin *(Reprints of papers)* a admise, est la convection par les pointes végétales[2] ou autres aspérités élevées de la surface terrestre.

256. *Résultat annoncé par le Dr Linss.* — Mais, d'une façon plus générale, agit le contact même de l'air pour donner

[1] Lord Kelvin, On the electrification of air *(Proceedings of the Roy. Soc.*, vol. LVI, p. 90 ; *New Science*, vol. II, n° 40, p. 435, 1895.)

[2] M. Ch. Ritter (Actions élémentaires dont dépend la croissance des nébules et des hydrométéorites, *Ann. Soc. Mét. France*, p. 402, 1887) a constaté « que les aiguilles des arbres résineux, les pointes des graminées, les feuilles épineuses agissent absolument comme des pointes métalliques, tandis que les poils, la laine, les plumes, le bois sec, si effilés qu'ils soient, sont inefficaces sauf, quand par l'humidité ces corps se trouvent recouverts d'un enduit liquide conducteur ».

lieu à la déperdition expérimentalement constatée sur les conducteurs chargés. Et, sans aller plus loin dans l'examen des causes qui peuvent faire varier cette déperdition avec la nature de la surface extérieure de la terre, je signalerai le résultat suivant annoncé par le Dr Linss[1].

De ses expériences sur la dispersion de l'électricité du sol dans l'air libre, il résulte que la perte naturelle serait de 1 o/o par minute ; c'est-à-dire que, pour que l'électricité du sol reste constante, il faudrait que, en cent minutes, il soit fourni à la surface une quantité d'électricité égale à sa charge totale.

Ce coefficient n'est qu'approximatif et vraisemblablement beaucoup trop grand. En l'admettant pour la période diurne, dans laquelle il a été déterminé, il faudrait conclure que la cause de l'électrisation présumée produit en cent minutes la charge totale de l'atmosphère ; soit, en moyenne, 0,0003 U. E. cgs, entre les limites de l'atmosphère et le sol dans un cylindre de 1 centimètre carré de section.

257. L'état électrique de l'atmosphère résulterait donc de ces deux actions électrisantes et désélectrisantes s'exerçant inégalement, l'avantage restant en somme et généralement à la première.

Mais suivant que l'une ou l'autre de ces actions en un lieu deviendrait prédominante dans les couches basses, où leurs produits tendent à s'accumuler, l'intensité du champ sur le sol inférieur plan (par ciel serein) oscillerait entre une limite maxima, qui paraît être voisine de 600 $\frac{\text{v.}}{\text{m.}}$ et une limite minima qui ne peut être que nulle ou faiblement négative (par le fait de la plus grande proximité des masses négatives).

[1] Dr Linss, Ueber einige die Wolken und Luftelektricität bettrefende Problème *(Met. Zeitschr.*, p.343, Berlin, 1887).

Anomalie négative des couches basses.

258. L'examen des cas où le champ atteint cette limite minima, c'est-à-dire où les masses négatives deviennent prédominantes dans les couches basses, achève d'établir (du moins pour le cas de la période d'insolation) la généralité de la relation entre l'intensité du champ et l'intensité du rayonnement solaire (voy. § 250) en un lieu de la surface de la terre.

Il fait penser à la possibilité de l'action dispersive de ce rayonnement sur la charge négative du sol, du moins lorsque les substances qui constituent la croûte terrestre présentent un état de sécheresse convenable[1] ou un degré de pulvérisation propre à favoriser la convection.

259. J'ai mentionné plus haut (§ 198) ce résultat de l'observation, à savoir que, même par beau temps et sans précipitation lointaine, le champ s'affaiblit extraordinairement, s'annule et même devient négatif lorsque le courant atmosphérique ascendant acquiert une intensité extraordinaire.

L'intérêt de ce fait résulte de la conclusion que M. Ch. André[2] a tirée de son étude, dont je me suis servi pour rendre compte des observations de Lecher et de Tuma (§ 198), et suivant laquelle ce phénomène se présente comme une exagération du minimum de l'après-midi, habituellement observé dans les stations basses de nos régions.

La remarque suivante corrobore cette conclusion en même

[1] MM. Elster et Geitel ont en effet trouvé qu'un certain nombre de substances minérales de la croûte terrestre manifestent une dispersion négative très nette, même sous l'action des rayons de réfrangibilité moindre que l'ultra-violet; mais qu'aucune surface humide ne présenterait de sensibilité à cette action (*Wied. Ann.*, t. XLIV, p. 722). Ce dernier fait résulte aussi des récentes expériences de M. Buisson, annoncées par M. Marcel Brillouin (*Revue Générale des Sciences*, 8e année, p. 641, 30 août 1897).

[2] Ch. André, *loc. cit.*, p. 135.

temps qu'elle manifeste la relation entre l'intensité du champ et la transparence de l'air à l'époque des maxima et des minima diurnes.

L'affaiblissement diurne du champ, mais plus encore l'anomalie négative, correspond à une limpidité extraordinaire des couches basses, justement opposée à l'opacité normale et exagérée qui correspond au maximum diurne et à l'anomalie positive.

Une dispersion rapide des éléments condensés (visibles) des couches basses et, par suite aussi vraisemblablement, de l'acide carbonique accumulé dans les brouillards (cas du dégel) et de la vapeur d'eau produite pendant une période de sécheresse ; telles sont les conditions, corrélatives d'un dégel rapide en hiver, et plus généralement de l'arrivée d'une dépression après une longue période de beau temps, qui donnent lieu, dans nos climats, à un affaiblissement extraordinaire du champ au voisinage du sol et, par suite, à la prédominance des masses négatives dans les couches inférieures.

260. Ces conditions sont aussi celles qui président à l'apparition normale de l'électricité négative, au milieu du jour, pendant les mois de la saison sèche à Batavia. (Voy. p. 172, note 2.)

Comme dans nos climats, cette apparition y est corrélative d'un accroissement extraordinaire de l'intensité du vent joint à un minimum d'humidité relative de l'air[1].

261. L'observation visuelle de l'atmosphère faite à l'Observatoire de Lyon — où le phénomène a été noté avec soin — montre que cette apparition d'électricité négative au milieu de la journée, y est en outre toujours accompagnée d'un soulèvement rapide et considérable de la poussière des routes, qui se répand dans les couches voisines du sol où elle forme un voile transparent de brume jaunâtre très caractéristique.

Les courbes de l'électromètre enregistreur (dont je repré-

[1] Voy. Observations de Batavia, *loc. cit.*, p. 191-199, 1896.

sente quelques fac-simile, pl. VIII, IX et X) montrent que le passage au négatif se produit avec des oscillations rapides et considérables qui manifestent une tendance constante du champ à reprendre sa valeur positive — qu'il reprend toujours avant le coucher du soleil — malgré l'intensité horizontale persistante du vent et une valeur peu différente et variable des autres éléments météorologiques mesurés.

262. Il me semble, d'après ces remarques, que le phénomène doit être attribué, conformément aux actions normales reconnues : en partie à la dispersion, de part et d'autre du lieu et dans la hauteur, de l'élément positif normal (acide carbonique et poussières de l'air) ; en partie à la convection de la charge négative du sol, par l'énergie dispersive du rayonnement solaire extraordinairement intense, et par l'intermédiaire des poussières soulevées du sol.

CHAPITRE IV

CONCLUSIONS RELATIVES AUX THÉORIES EXISTANTES DE L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE

263. En raison des conclusions que j'ai déduites de mes observations dans les chapitres précédents, il ne paraît pas que j'aie à examiner les diverses théories qui reconnaissent dans l'atmosphère normale la présence *exclusive* de masses négatives empruntées à une charge négative propre du globe : que cette charge d'ailleurs soit supposée due à des actions thermiques ou chimiques internes, comme dans l'opinion de *de la Rive* ou de *Lamont*, ou considérée comme un excès originel invariable ainsi que l'imaginait *Peltier* et comme *M. Exner*[1] a tenté de l'expliquer.

Le fait de la décroissance du champ avec la hauteur condamne ainsi, outre un certain nombre d'opinions anciennes, l'explication de *Pellat*[2] qui admet l'hypothèse de *Peltier* avec une atmosphère plutôt négative, aussi bien que les idées de *W. Thomson*[3] *(Lord Kelvin)* suivant lesquelles l'équivalent positif de la charge du globe serait confiné dans les couches supérieures de l'atmosphère. Ce fait suffit de même à réfuter la théorie de *Sohncke* et *Luvini*, suivant laquelle le champ serait produit par l'électrisation positive (par frottement) des cristaux de glace flottant dans l'atmosphère supérieure, tandis que l'air humide entraînerait dans l'atmosphère inférieure l'équivalent négatif qui se répandrait sur la terre.

[1] Fr. Exner, Ueber die Ursache und die Gesetze der atmosphärischen Elektricität *(Sitzungsberichte Wien*, XCIII, p. 285, 1886).

[2] Pellat, *J. de Phys.*, 2e série, t. IV, p. 18, 1885.

[3] W. Thomson, *Reprints of papers*, § 281, p. 218.

La théorie d'*Edlund*[1], d'après laquelle la densité positive de l'air croîtrait avec l'altitude, est également mise en défaut.

La variation du champ avec l'altitude, invoquée par *Exner* en faveur de sa théorie (contre celles de la plupart de ses devanciers) est, d'après les nouvelles déterminations, absolument opposée aux vues de ce physicien aussi bien qu'aux vues similaires d'*Elster* et *Geitel*[2], d'*Arrhénius*[3] et de *L. Weber*[4]; dans lesquelles la vapeur d'eau selon les uns, les particules solides et liquides de l'atmosphère inférieure selon les autres, comportent *normalement* et *exclusivement* une charge négative empruntée à la surface de la terre.

264. Quant aux autres théories, je considère avec *Edlund*[5] « superflu de me livrer ici à l'examen d'essais d'explication de l'électricité atmosphérique totalement dépourvus de fondement physique, tels, par exemple que ceux qui se basent sur le développement non prouvé de l'électricité dans l'évaporation ou la condensation de la vapeur d'eau, sur le frottement de l'air sec contre l'air humide, sur le frottement des courants d'air froid contre des courants d'air chaud, sur le frottement de l'air sec contre des grêlons, etc. ».

Les bases expérimentales des théories du frottement se ramènent toutes à des actions analogues à celles qui entrent en jeu dans la machine hydro-électrique d'Armstrong, c'est-à-dire dans des conditions de pression et de température fort éloignées des conditions naturelles ordinaires.

265. On ne peut, d'autre part, songer avec *Lénard*[6] à

[1] Edlund, *Sur l'origine de l'électricité atmosphérique, du tonnerre et de l'aurore boréale* (Stockholm, 1884).

[2] Elster et Geitel, *Sitzungsberichte Wien*, t. CI, 1892, mémoire cité, p. 885.

[3] S. Arrhénius, *Wied. Ann.*, XXXII, 1887 et XXXIV, 1888; *Met. Zeitschr.*, p. 297 et 348, 1888.

[4] Weber, *Naturwissenschaftliche Rundschau*; Jahr. V, p. 53 et suiv., 1890.

[5] Edlund, Considérations sur certaines théories relatives à l'électricité atmosphérique (*Ann. de Chim. et de Phys.*, 6e série, t. XIV, p. 145, 1888).

[6] Lénard, Ueber die Elektricität der Wasserfalle (*Wied. Ann.*, XLVI, p. 631, 1892).

transporter, du laboratoire dans la nature, des actions telles que celles qui naissent du choc des gouttelettes liquides contre le sol ou contre une surface d'eau. Les récentes expériences de Lord Kelvin[1] montrent à mon avis que l'électrisation de l'air par son barbotement dans les liquides, à laquelle se ramènent les actions découvertes par Lénard, est trop facilement variable avec des altérations chimiques de l'eau, par exemple, avec des traces insensibles de sel marin ou d'autres substances présentes dans l'atmosphère, pour être censée donner lieu au champ normal invariablement positif que l'on mesure tant à la surface des mers que sur les continents, tant à l'équateur que sous nos latitudes et jusqu'au Spitzberg (d'après Exner et Andrée).

M. Lénard considère, il est vrai, que la mer, recouvrant plus des deux tiers de la surface terrestre, peut fournir à l'air par son action continue, une quantité d'électricité positive vraisemblablement plus grande en moyenne que la quantité d'électricité négative provenant des autres sources ; de telle sorte que le choc des vagues se présenterait comme la source de l'électricité atmosphérique normale.

Lord Kelvin[2] admet comme très probable qu'il existe de ce fait, en mer, une prépondérance d'électricité positive, et que, sous l'action des vents, cette électricité est emportée à des hauteurs considérables au-dessus de l'océan. Mais il ne peut cependant admettre que le prompt rétablissement du champ normal après la précipitation, en un lieu du continent, soit dû à un apport d'air positif de la mer.

En définitive, les actions reconnues par Lénard doivent être considérées, avec les actions de frottement, comme des causes accidentelles de variation du champ électrique à la surface de la terre.

266. *Lord Kelvin* pense que la pluie est elle-même la

[1] Lord Kelvin, Compte-rendu des S^ces de la Soc. Roy. de Londres (*Revue Générale des Sciences*, p. 396, 1895).

[2] Lord Kelvin, On the electrification of air (*N. Science*, vol. I, p. 594, 1895).

source de l'électricité positive normale[1]. Il a récemment exprimé cette idée que « la pluie ou la neige, résultant de la condensation des nuages dans l'air supérieur, doit s'électriser négativement à mesure qu'elle croît et doit laisser de l'électricité positive dans l'air d'où elle tombe. Ainsi, la pluie tombant d'un air négativement électrisé le laisserait moins négativement électrisé, ou non électrisé ou positivement électrisé ; la pluie tombant d'un air non électrisé le laisserait positif ; et la pluie tombant d'un air positivement électrisé le laisserait avec plus d'électricité positive qu'il n'en avait avant d'avoir perdu l'eau de sa composition. »

Mais c'est une simple vue de l'esprit que Lord Kelvin n'a pas réussi à établir par l'expérience et qui, d'ailleurs, ne préjugeant rien de l'état électrique normal de l'air, ne fournit pas la raison de cet état.

En attribuant aux précipitations le rôle de ramener sur le sol l'électricité négative dispersée du globe dans l'atmosphère, les théories fondées sur l'hypothèse de Peltier, conduisent à un résultat analogue relativement à l'entretien du champ normal.

Toutefois, les observations d'Elster et Geitel[2] montrent que les précipitations sont tantôt positives, tantôt négatives, quoique plus fréquemment négatives.

Le double signe des précipitations et la nature des perturbations du champ que produisent ces phénomènes me font présumer que les quantités d'électricité de signes contraires mises en jeu dans ces cas anormaux proviennent en majeure partie de l'influence du champ, dépendant lui-même d'une cause normale plus générale.

267. En se reportant aux théories électro-chimiques émises dans la première moitié de ce siècle, par *Pouillet*[3] et par

[1] « The real restorer of the normal fair weather positive » : Lord Kelvin, *N. Science*, p. 595, 1895.

[2] Elster et Geitel, Ueber eine Methode des elektrische Natur der atmosphärischen Niederschläge zu bestimmen *(Met. Zeitsch*, p. 95, 1888).

[3] Pouillet, *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXV, p. 405, 1827.

Becquerel[1], et discutées par *de la Rive, Dellmann* et autres[2], on trouve, au milieu de toutes les divergences d'opinion concernant la réaction qui peut donner lieu à l'excédent positif de l'atmosphère, deux résultats expérimentaux auxquels le manque de faits d'observation relatifs à l'électricité atmosphérique et à la composition de l'atmosphère, n'avaient permis de donner jusqu'ici, ni une interprétation suffisante ni une justification probante.

Ces deux résultats se rapportent au dégagement d'électricité positive dans les combustions et la décomposition des matières organiques.

268. D'après *Pouillet*[3], « lorsque l'oxygène se combine avec le carbone, l'acide carbonique qui se forme est électrisé positivement, tandis que le carbone restant s'électrise négativement. »

Or « s'il est vrai », dit Pouillet, « que tout acide carbonique est électrisé positivement au moment de sa formation, il en résulte que les plantes doivent produire dans l'air, par expiration de cet acide, une quantité d'électricité positive plus ou moins considérable ». Ce physicien chercha à vérifier cette conclusion directement par expérience, et il crut pouvoir déduire des résultats obtenus que, « sur une surface en végétation de 100 mètres carrés, il se dégage en un jour plus d'électricité positive qu'il n'en faudrait pour charger la plus forte batterie ».

269. En attendant de pouvoir vérifier ces résultats, je me crois autorisé à admettre avec Pouillet que les mêmes effets électriques sont aussi déterminés par les autres causes de production de l'acide carbonique de l'air.

[1] Becquerel, *C. R. Ac. des Sc.*, p. 733, 1855; p. 661, 1856. *L'Institut*, p. 137 et 433, 1859.

[2] Voy. Hamberg, *loc. cit.*, p. 69 et suiv.

[3] Pouillet, *loc. cit.* Voy. aussi Duprez, De l'état de nos connaissances sur l'électricité de l'air *(Mémoires couronnés et Mémoires des savants étrangers*, Bruxelles, t. XVI, 1843)

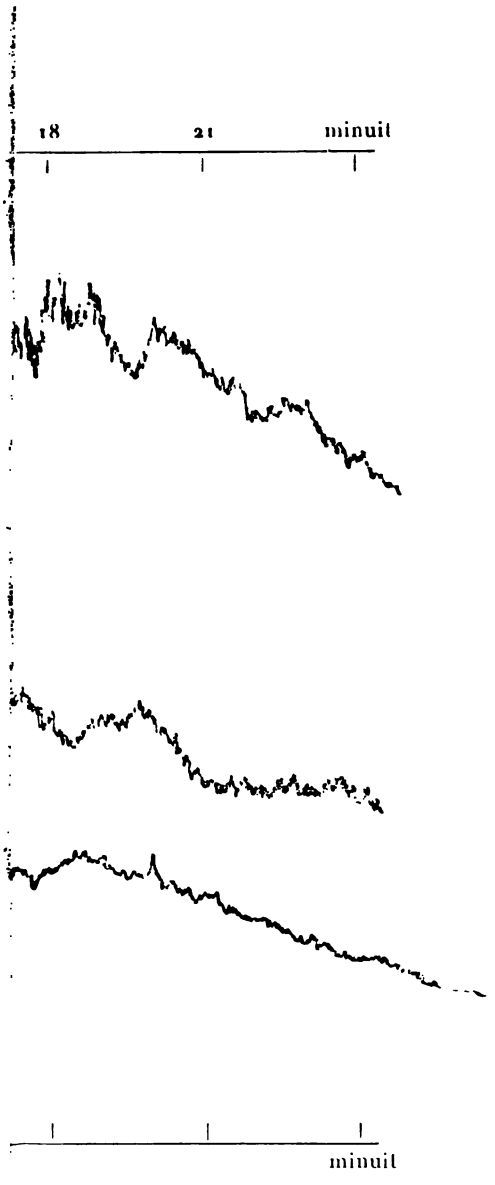
L'électrisation que j'ai admise à titre d'hypothèse, fournissant l'explication simple et rationnelle de tous les faits d'observation bien établis et s'appuyant sur un résultat expérimental au moins très vraisemblable, doit être considérée comme la cause la plus probable du champ électrique normal de l'atmosphère.

Pour terminer, je ferai remarquer que le phénomène de l'électricité atmosphérique n'a pas une liaison directe nécessaire avec ceux du magnétisme terrestre et de l'aurore boréale.

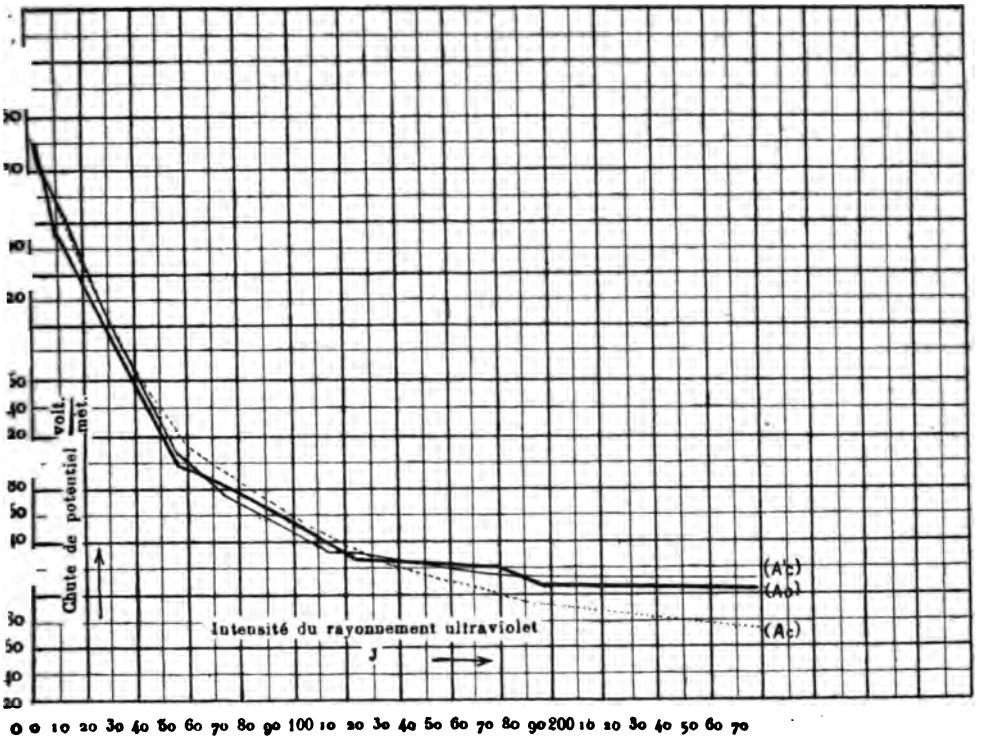
Le caractère local et climatérique des variations électriques était déjà reconnu; mais mes mesures en ballon auront eu pour principal résultat de montrer en outre que la cause de ces variations est localisée dans les couches inférieures de l'atmosphère, et qu'elle ne dépend pas (du moins directement) des phénomènes qui ont pour siège les couches très raréfiées de l'atmosphère supérieure.

Au surplus, j'ai la conviction que ces derniers phénomènes, aurores boréales, trouvent leur explication dans les transformations de l'énergie radiante du soleil, considéré comme lieu d'émission d'un rayonnement cathodique variable. Ce rayonnement dévié par l'aimant terrestre, absorbé et transformé en lumière phosphorescente par les particules de poussières cosmiques répandues à toute hauteur dans l'atmosphère, donne la raison des phénomènes lumineux de l'aurore boréale et des nuages noctiluques qui apparaissent (d'après O. Jesse) à une hauteur moyenne de 82 kilomètres.

Cette conviction résulte pour moi du rapprochement des phénomènes étudiés et des idées émises dans le mémoire de *Paulsen* sur la nature de l'aurore boréale *(loc. cit.)*, dans l'ouvrage de M. *Ch. Ed. Guillaume* sur les rayons X (Gauthier-Villars, 1896) et dans les remarques générales de M. *Deslandres* sur l'atmosphère solaire (*Observations de l'éclipse totale du soleil du 16 avril 1893*, Gauthier-Villars, 1896; p. 62 et suiv.).



ides du champ
on.



Courbe observée (A_0).

Courbe calculée (A'_c) $\frac{dV}{dn} = C + Aa^{-J} \begin{cases} \log a = 0{,}01. \\ C = 110. \\ A = 360. \end{cases}$

— — (A_c) $\frac{dV}{dn} = \frac{470}{1 + 0{,}02J}$.

PLANCHE VII. — Relation entre l'intensité du champ et l'intensité du rayonnement ultra-violet. (D'après Elster et Geitel.)

PREMIÈRE PARTIE

INSTRUMENTS ET MÉTHODES

CHAPITRE PREMIER. — Instruments.

18. Division en deux groupes. — Classification. 9
19. Instruments d'observatoire fixe (Electromètre Mascart). 9
20 Valeur relative de la mesure du potentiel en un point de l'air, obtenue dans l'installation fixe. 1
21. Usage des appareils transportables. 10
22. Electromètre portatif de Thomson. 10
23. Nécessité et avantage des électromètres idiostatiques 11
24. Conditions d'établissement de l'électromètre d'Exner 12
25. Description de l'électromètre d'Exner. 12
26. Qualités et défauts 14
27. Appareil portatif de Palmieri 14

CHAPITRE II. — Méthodes.

Classe I.

28. Principe des méthodes de cette classe. 15
29. Définition, division et fonctionnement théorique des *collecteurs*. . 15

I. *Conducteurs allongés.*

30. Historique. 16
31. Observations et opinion de Sir W. Thomson. 17
32. Observation et opinion de l'auteur. 17
33. Conclusion. 19

II. a) *Pointes métalliques.*

34. Historique 19
35. Observations et opinion de l'auteur 21
36. Conclusion. 21

b) *Tiges d'aluminium.*

37. Historique de l'emploi. 22
38. Déperdition négative de l'aluminium à la lumière diffuse. Expériences de M. Elster 22

39. Observation de M. Börnstein. — Expériences de M. Branly . . . 22
40. Conclusion. 22

III. *Flammes et mèches.*

41. Historique 23
42. Usage des mèches. — Expériences de M. Pellat 23
43. Résultats et conclusions d'expériences de l'auteur. 24
44. Flammes. — Expériences de M. Pellat 24
45. Appareil portatif de M. Exner 25
46. Appareil de MM. Elster et Geitel 25
47. Inconvénients des appareils portatifs. — Extinction. 25
48 Gaz dans les installations fixes. — Emploi aux Etats-Unis. . . . 26
49. Description de l'appareil du Sergent Park-Morrill 26

IV. *Ecoulements d'eau.*

50. Historique 29
51. Objections de Palmieri à l'emploi de ce collecteur 29
52. Fonctionnement théorique. — Rendement 30
53. Exemples de rendement pratique : Pellat, Fr. Exner, Observatoire de Lyon. 30
54. Débit. Expériences de M. Pellat. Influence de la grosseur des gouttes 31
55. Isolement. Isolateurs Mascart 32
56. Emploi de la paraffine à la Tour Eiffel 32
57. Emploi du soufre tourné à l'Observatoire de Lyon. — Résultats. . 32
58. Constance nécessaire du rendement 33
59. Réglage du débit. — Dispositif de M. Pellat. — Conséquences d'un débit d'eau variable, dans les installations fixes. 33
60. Entretien de l'isolement 34
61. Inconvénient : congélation de l'eau. — Dispositifs imaginés pour l'éviter : Etats-Unis, Spitzberg (S. A. Andrée). 34
62. Conclusion et remarque 35

CLASSE II

63. Principe des méthodes de cette classe 36
64. Comparaison avec le principe de la méthode précédente. — Signification des mesures 36
65. Avantage théorique. 37
66. Inconvénients pratiques 38
67. Méthode de Peltier; procédé de Dellmann. — Historique de leur emploi 38
68. Méthode du conducteur mobile 39

69. Procédé employé par de Saussure. 39
70. Appareil de Hankel 40
71. Appareil de Thomson 40
72. Qualités relatives de ces appareils. 41
73. Appareil à conducteur mobile de Palmieri 41
74. Défauts de ces appareils 42
75. Interprétation des mesures faites avec l'appareil de Palmieri. . . 42
76. Appareils à indications continues fondés sur le principe de ces méthodes. — « Machine électrique atmosphérique » de Palmieri. 44
77. Collecteur mécanique du Professeur Rowland. — Description. . . 45

DEUXIÈME PARTIE

EXPLORATION ÉLECTRIQUE DE L'ATMOSPHÈRE

CHAPITRE PREMIER. — Historique.

78. Expérience de Franklin. 49
79. Expériences de Romas avec des barres inclinées et sur l'influence de la hauteur. 49
80. Observations de de Saussure, de Schübler, etc. 50
81. Observations de Becquerel et Breschet 50
82. Observation de Gay-Lussac et Biot 51
83. Conclusion ancienne. 51
84. Interprétation d'Ermann et de Peltier. 51
85. Ambiguïtés d'expression des résultats 51
86. Langage de Peltier, double acception du mot *tension* 51
87. Enoncé, en langage théorique moderne, des conclusions de Peltier. 52
88. Rectification du langage de Palmieri. — Enoncé correct du résultat de ses observations. 53
89. Observations de Palmieri et de Denza. 54
90. Explication de M. Exner et de M. Ch. André 54
91. Réfutation de Palmieri. 54
92. Conséquence : nécessité des observations en ballon ; opinion de de Saussure 55

CHAPITRE II. — Discussion des Méthodes et des Résultats.

93. Division des méthodes en trois modes expérimentaux distincts. . 56
I. *a)* L'observateur est sur le sol : *Méthode du cerf-volant* . . . 56
b) L'observateur est dans un aérostat en communication avec le sol : *Méthode du ballon captif* 56
II. — Un observateur est sur le sol ; un autre dans un aérostat captif 56

III. — L'observateur est dans un aérostat libre, sans aucune communication avec le sol 56
94. Signification générale des mesures. — Choix préalable du mode III. 57

MODE I.

95. Discussion théorique 57
96. Procédé *a)* : causes d'erreur. — Opinion de Palmieri. 58
97. Procédé *b)* : projet de M. P. Marcillac. — Inconvénients théoriques et danger pratique 59
98. Impossibilité des mesures électrométriques comparables 60
99. Méthode galvanométrique relative à ce mode expérimental. — Expérience de Colladon. — Cerfs-volants de Peltier et de Clarke. . 60
100. Courant qui parcourt le fil en communication avec la terre. . . . 61
101. Variation et loi de l'écoulement électrique par les pointes . . . 61
102. Interprétation théorique des résultats donnés au galvanomètre quand l'extrémité supérieure est munie d'un collecteur . . . 62
103. *Expériences.* — Cerfs-volants de Franklin, de Romas, etc. — Remarques de Romas 63
104. Expériences de Peltier. — Résultats et conséquences 64
105. Expériences du professeur Léonhard Weber de Kiel. — Mesures galvanométriques précises de l'intensité du courant. 66
106. Considération théorique et formule de Weber. 67
107. Exécution des expériences. — Résultat des mesures 68
108. Discussion. — Conclusion. 68
109. Expériences de M. A. Mc Adie à l'Observatoire de Blue Hill. — Electromètre à quadrants multiples. 69
110. Expériences à faible hauteur. — Mesures électrométriques d'Exner : Résultats 70
111. Mesures de Lemström dans les régions polaires. — Méthode galvanométrique 71-74
112. Interprétation des résultats. — Conséquences relatives à l'état électrique particulier de l'atmosphère des régions polaires. — Observations de Paulsen 74-76

MODE II.

113. Expériences du professeur E. Semmola. — Description 76
114. Observations. — Résultats 77
115. Interprétation de Palmieri. — Discussion 78
116. Opinion de M. Semmola sur sa méthode et les résultats qu'on en peut attendre. — Discussion. — Réfutation 79
117. Méthode de Holmgren. — Expériences. — Incertitudes 80
118. Conclusion 81

Mode III.

119. Observations en ballon libre 8
120. Observations de Biot et Gay-Lussac. — Description. 8
121. Discussion des observations 8
122 Interprétation de Biot 8
123. Discussion de la méthode. — Erreurs à craindre. — Incertitudes. 82
124. Plan d'exploration électrique de l'atmosphère proposé par de Saussure. 83
125. Il indique les précautions à prendre. 84
126. Remarques pratiques de de Saussure 84
127. Réflexion de l'auteur 86
128. Plan de M. F. Exner. — Usage des collecteurs à écoulement d'eau. Mesure du champ $\frac{dv}{dn} = \frac{\text{Volt.}}{\text{mèt.}}$ 86
129. Plan de l'historique des expériences 86
130. Observations de M. Lecher, à Vienne. — Description. 86
131. Résultats. — Interprétation de M. Exner 87
132. Projet d'étude formé par M. Ch. André 87
133. Modification du dispositif d'Exner. — Essais en ballon captif à Grenoble 87
134. Description de l'appareil 88
135. Résultats des essais faits le 21 et le 22 mai 1892 88
136. Expérience du 23 mai 1892. — Résultat 88
137. Conséquences. — Danger des observations en captif 89
138. Conclusion. — Préparation des expériences en ballon libre. — Description du nouveau dispositif. 89
139. Ascension du 27 septembre 1892, dans le ballon *l'Espérance*. — Tentative infructueuse et catastrophe. 90
140. Expérience de M. J. Tuma. — Description et résultats. 91
141. Conditions atmosphériques. — Conclusion de M. Tuma. . . . 91
142. Mission de l'auteur à Chalais-Meudon. — Ascensions du 1er et du 9 août 1893. 92
143. Résultats nouveaux des expériences. — Craintes de l'auteur. — Explication des conclusions publiées. 92
144. Expériences de M. Börnstein. — Dispositif employé. 94
145. Résultats de l'ascension du *Phönix* le 18 août 1893. — Remarques de M. Börnstein. 94
146. Résultats de l'ascension du 29 septembre 1893. 95
147. Expérience de M. O. Baschin. — Description de l'appareil. — Résultats. 96
148. Résumé et comparaison des résultats. 97
149. Conclusion immédiate de l'auteur. — Conciliation arbitraire des résultats de sens contraires. 97
150. Influence perturbante et systématique à craindre. 97

151. Considération théorique de l'état électrique du ballon dans le champ atmosphérique. 97
152. Nécessité de la reprise des expériences. — Conditions à remplir. 98

TROISIÈME PARTIE

CONTRIBUTION PERSONNELLE

CHAPITRE PREMIER. — Premières expériences.

153. Description du dispositif expérimental. 99
154. Conditions de fonctionnement électrique. 99
155. Dispositif aérostatique du ballon *le Biot*. 100
156. Expériences des 1er et 9 août 1893. — Valeur des mesures. . . . 101
TABLEAU I. — Tableau des résultats et des remarques de la première ascension à Meudon 101
TABLEAU II. — Tableau des résultats et des remarques de la deuxième ascension à Meudon 102
157. *Remarques sur les conditions et les conséquences de la première ascension*. 103
158. *Conditions et conséquences de la deuxième ascension*. 104
159. Conclusions 105

CHAPITRE II. — Nouvelles expériences.

SYSTÈME EXPÉRIMENTAL

Travaux préparatoires.

160. Dispositions à prendre en raison des conditions à remplir. . . . 106
161. Moyen de les obtenir. 106
162. *Conditions de combustion d'une mèche fonctionnant comme collecteur d'électricité*. — Expériences de l'auteur. 107
163. Conséquences et conclusion. 108

Appareil.

164. Mèches. 109
165. Collecteurs. 109
166. Conducteurs. 109
167. Electromètre. 110
168. Disposition sur la nacelle. 111
169. Conditions d'allumage des mèches en ballon. — Résultats d'expériences. 111
170. Allumoir. 112
171. Psychromètre-fronde. 112

172. Premier appareil construit. — Conditions satisfaisantes de fonctionnement. 113
173. Conséquences et conclusion. 113
174. Desiderata. — Organisation d'une ascension d'essai à Lyon. . . 113

Troisième expérience

Ascension.

175. Préparation et départ. 114
176. Exécution des expériences. 114
177. Atterrissage. 115

Résultats et discussion des mesures électriques.

178. Mesures en ballon. — Tableau III. 115
179. Mesures simultanées sur le sol. — Comparaison. 116
180. Comparaison des mesures simultanées sur le sol à 178 mètres et 300 mètres. 116
181. Discussion. — Observations simultanées aux États-Unis. . . . 117
182. Conclusion. — Atmosphère électrique positive. 117

État corrélatif de l'atmosphère.

183. Tableau IV des mesures de température et d'humidité en ballon. . 118
184. Observations météorologiques sur le sol, le même jour. 119
185. Comparaison. 120
186. Distribution verticale de la vapeur d'eau. — Formule représentative 120

Discussion et conséquences : — Caractère général du champ.

187. Comparaison de l'état du champ avec l'état de l'atmosphère. — Conclusion négative par rapport aux théories de la 2e classe (Introduction). 121
188. Comparaison de l'état de l'atmosphère avec son état habituel à l'époque du maximum matin des beaux jours. — Conclusion affirmative quant au siège principal des masses influentes. . . 121
189. Comparaison des valeurs du champ obtenues dans les diverses ascensions à grande hauteur. — Conclusion quant au lieu des principales variations. 122
190. Observations de MM. Elster et Geitel sur le Sonnblick. — Double caractère de la variation diurne. 123

Caractère météorologique des variations du champ. Mécanisme et source présumés de ces variations.

191. Variation diurne et variation en latitude. — Relation avec le mouvement circulatoire de l'air. 124
192. Signification de la valeur du champ déduite des résultats des mesures en ballon. 125
193. Valeurs relatives possibles aux diverses altitudes en conséquence du double caractère de la variation diurne. 125
194. Action électrique du mouvement de circulation de l'air. 126
195. Comparaison avec la variation du baromètre. — Conséquences. . 126

Explication des observations de Tuma et de Lecher.

196. Base de l'explication. 127
197. Etude des conditions météorologiques relatives à l'observation électrique de M. Tuma. — Courant ascendant. 128
198. Relation établie par M. Ch. André. — Ses conséquences confirment l'explication. 129
199. Condition du champ électrique de l'atmosphère. 129
200. Raisons et conditions de la poursuite des expériences. 130

QUATRIÈME EXPÉRIENCE

Ascension

201. Appareil. 130
202. Aérostat : le *Touring-Club*. 131
203. Ascension. — Exécution des expériences. 132
204. Etat apparent de l'atmosphère. — Atterrissage. 133

Résultats et discussion des mesures électriques.

205. Tableau V. — Tableau des mesures individuelles dans l'ordre des observations. 134
206. Objet de la discussion. 137
207. Elimination du temps dans les mesures. — Champ sur le sol. . . 137
208. Valeur du champ à 4000 mètres. — Comparaison avec le sol. — Conclusion quant au sens général de la variation. 138
209. Quantité d'électricité positive de l'atmosphère. 138
210. Considération de la série des mesures. — Nature des écarts. . . 139
211. Tableau VI. — Tableau des mesures ordonnées suivant les altitudes croissantes. 140
212. Représentation graphique. — Courbe de la variation observée. . 141
213. Singularité autour de 2000 mètres. — Anomalie réelle. — Attestation de l'exactitude des mesures. 141

214. Essais de représentation arbitraire : courbes calculées (A et B). — Comparaison. 141
215. Discussion. — Indétermination et anomalie dans les couches inférieures. 144
216. Variation générale et anomalie des couches basses. 144
217. Importance et généralité de l'anomalie des couches basses. — Conclusion. 144

État corrélatif de l'atmosphère.

218. Mesures psychrométriques : — Diagrammes de l'enregistreur. — Valeurs correspondantes sur le sol. — Tableau VII des quantités déduites. 145 147
219. Distribution verticale de la vapeur d'eau. — Formule. — Courbes 147
220. Comparaison avec la normale. — Anomalies générale et locale. . 149
221. Etat figuré de la couche atmosphérique explorée. 151
222. Explication par la distribution générale des pressions. — Carte des Isobares 151
223. Conclusion 152

DISCUSSION ET CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Relation entre la distribution de la vapeur d'eau et la distribution des masses électriques dans l'atmosphère.

224. Expression du champ en fonction du poids de vapeur d'eau. — Calcul des observations. — Valeurs les plus probables du champ sur le sol et du coefficient d'électrisation de la vapeur d'eau. — Représentation satisfaisante de la variation du champ. — Enoncé de la relation générale. 152
225. Anomalie apparente observée dans les couches moyennes. — Elle confirme la relation générale. 154
226. Electrisation positive de la vapeur d'eau atmosphérique. — Limite du champ. . . . . .
227. Densité électrique positive des cristaux de glace des hautes régions 156
228. Conséquence relative à la théorie de Sohncke. 156

Anomalie positive des couches basses.

229. Valeur de l'anomalie, le 11 septembre. 156
230. Circonstances qui l'ont révélée. — Coefficients d'électrisation de la vapeur dans les autres expériences. 157
231. *Explication* qui la rattache à la relation annoncée. 157
232. Considération des particules condensées de la brume et du brouillard. 158
233. Eau atmosphérique non mesurée au psychromètre. 158
234. Calcul approximatif de vérification dans le cas du 11 septembre. . 159

Conséquences probantes.

235. Brume et intensité du champ. — Observations de MM. Elster et Geitel. 160
236. Humidité brumeuse de l'air. — Relations météorologiques. . . . 161
237. Maxima diurnes et annuel du champ et de l'humidité brumeuse. . 162

Discussion.

238. Relation du champ et de l'humidité relative ou absolue sur le sol. — — Raison des contradictions. — Conséquence relative à la relation établie dans la hauteur. 163
239. Champ et quantité totale d'eau atmosphérique en hiver et en été. 163
240. Conséquences. — Intervention électrique présumable des poussières et des cristaux de glace. 164

Conclusion.

241. Insuffisance de cette intervention. — Difficultés et contradiction concernant l'hypothèse de l'électrisation spécifique de la vapeur d'eau. 165

CHAPITRE III. — Théorie proposée.

HYPOTHÈSE NOUVELLE CONCERNANT L'ORIGINE DES MASSES POSITIVES DE L'ATMOSPHÈRE

242. Electrisation positive de l'acide carbonique fourni par la terre à l'atmosphère (électrisation négative équivalente du sol). . . 167

Conséquences probantes.

243. Gaz constituant de l'atmosphère, l'acide carbonique participe aux variations générales du baromètre. 168
244. Gaz plus lourd que l'air, non permanent et soluble dans le brouillard, il tend à s'accumuler dans les couches basses. 168
245 Variations dans les couches basses. 169
246. Variations annuelle et diurne sur terre. 169
247. Variations sur mer 170
248. Variations dans les régions polaires et équatoriales. 171
249. Absorption et décomposition par les plantes sous l'action de la lumière solaire. 172

250. Relation entre l'intensité du champ et l'intensité du rayonnement ultra-violet du soleil. — Interprétation. — Conclusion. . . . 172
Remarques sur l'électrisation des poussières. 174
251. Phénomène corrélatif du champ. — Son importance. 175

ÉLECTRISATION NÉGATIVE DE L'ATMOSPHÈRE INFÉRIEURE

252. Sol négatif. — Conséquences : influence, déperdition. 175
253. Échanges de particules solides et liquides. 175
254. Convection et déperdition : de l'air au sol. 176
255. — — du sol à l'air. 176
256. Résultat annoncé par le Dr Linss. 176
257. Conséquence relative au maintien du champ. 177

Anomalie négative des couches basses.

258. Présomptions expérimentales de l'action dispersive du rayonnement ultra-violet. 178
259. Électricité négative par beau temps. — Conditions d'apparition. . 178
260. Observations de Batavia. 179
261. Phénomènes concomitants. 179
262. Explication 180

CHAPITRE IV. — Conclusions relatives aux théories existantes de l'Électricité atmosphérique.

263. Théories de Peltier, Pellat, W. Thomson, Sohncke, Edlund, Exner, Elster et Geitel, Arrhénius, L. Weber 181
264. Théories de l'évaporation et du frottement. — Conclusion. . . 182
265. Vues de Lénard. — Discussion. — Conclusion. 182
266. Vue de Lord Kelvin. — Discussion. — Conclusion relative à l'électricité des précipitations. 183
267. Théories électro-chimiques. — Pouillet, Becquerel. 184
268. Résultats des expériences de Pouillet. 185
269. Conséquences. — La théorie de l'auteur est la plus probable. 185
(Idées de l'auteur sur la cause de l'aurore boréale et l'indépendance entre ce phénomène et celui de l'électricité atmosphérique) 186

TABLE DES FIGURES ET DES PLANCHES

Figures

1. — Electroscope gradué d'Exner. 13
2. — Courbes de l'enregistreur de MM. Hermite et Besançon, obtenues au cours de l'ascension du *Touring-Club*, le 11 septembre 1897. 146
3 — Courbes des variations annuelles de la brume et du champ électrique à l'Observatoire de Lyon. 162

Planches

I. — Collecteur à flamme du Sergent Park Morrill. 27
II. — Collecteur mécanique du professeur Rowland. 45
III. — Ascension du 11 septembre 1897 : Variation du champ avec la hauteur. 142
IV. — Ascension du 11 septembre 1897 : Distribution verticale de la température, de la tension de vapeur et du champ électrique. 148
V. — Carte des Isobares du 11 septembre 1897. 150
VI. — Variation diurne des oscillations rapides du champ à l'Observatoire de Lyon.
VII. — Relation entre l'intensité du champ et l'intensité du rayonnement ultra-violet : Courbe observée et courbes calculées, d'après Elster et Geitel.
(VIII, IX et X). *Diagrammes électrométriques et valeurs horaires correspondantes des éléments météorologiques à l'Observatoire de Lyon :*
VIII. — Champ négatif par beau temps.
IX. — Champ négatif (dispersion rapide du brouillard).
X. — Champ négatif sans précipitations.

Lyon — Imp. Pitrat Aîné, A. Rey Successeur, 4, rue Gentil. — 17067

Librairie GAUTHIER-VILLARS, 55, quai des Grands-Augustins.

(Suite.)

Sur la représentation des courbes gauches algébriques, par Léon Autonne, ingénieur des Ponts et Chaussées, maître de conférences à la Faculté des Sciences . 3 fr.

Sur le résidu électrique des condensateurs, par L. Houllevigue, maître de conférences à la Faculté des Sciences . . . 3 fr.

Synthèse d'aldéhydes et d'acétones dans la série du naphtalène au moyen du chlorure d'aluminium, par L. Rousset, docteur ès sciences, chef des travaux de chimie générale à la Faculté des Sciences . . . 3 fr.

Recherches expérimentales sur quelques actinomètres électro-chimiques, par H. Rigollot, docteur ès sciences, chef des travaux de physique à la Faculté des Sciences. . . . . 5 fr.

Librairie J.-B. BAILLIÈRE et Fils, 19, rue Hautefeuille.

Recherches anatomiques et expérimentales sur la métamorphose des Amphibiens anoures, par E. Bataillon, professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Dijon, avec 6 pl. hors texte . . 4 fr.

Anatomie et Physiologie comparées de la Pholade dactyle. Structure, locomotion, tact, olfaction, gustation, action dermatoptique, phologénie, avec une théorie générale des sensations, par le Dr Raphaël Dubois, professeur à la Faculté des Sciences, 68 fig. dans le texte et 15 pl. hors texte. . . . . 18 fr.

Sur le pneumogastrique des oiseaux, par E. Couvreur, docteur ès sciences, chef des travaux de physiologie à la Faculté des Sciences, avec 3 planches hors texte et 40 figures dans le texte. . . . 4 fr.

Recherches sur la valeur morphologique des appendices superstaminaux de la fleur des Aristoloches, par Mlle A. Mayoux, élève de la Faculté des Sciences, avec 3 planches hors texte . . . . . 4 fr.

Etude stratigraphique sur le Jurassique inférieur du Jura méridional, par Attale Riche, docteur ès sciences, chef des travaux de géologie, avec 2 planches hors texte. 12 fr.

Etude expérimentale sur les propriétés attribuées à la tuberculine de M. Koch, faite au laboratoire de médecine expérimentale et comparée de la Faculté de Médecine, par M. le professeur Arloing, M. le Dr Rodet, agrégé, et M. le Dr Courmont, agrégé, avec 4 planches en couleurs . . . . . 10 fr.

Histologie comparée des Ebénacées dans ses rapports avec la Morphologie et l'histoire généalogique de ces plantes, par Paul Parmentier, professeur de l'Université, avec 4 planches hors texte . . . 4 fr.

Recherches sur la production et la localisation du Tanin chez les fruits comestibles fournis par la famille des Pomacées, par Mlle A. Mayoux, élève de la Faculté des Sciences, avec 2 planches hors texte. 3 fr.

Etude sur le Bilharzia hæmatobia et la Bilharziose, par M. Lortet, doyen de la Faculté de médecine, et M. Viallleton, professeur à la Faculté de médecine de l'Université de Montpellier, avec 8 planches hors texte et 8 figures dans le texte. 10 fr.

La Botanique à Lyon avant la Révolution et l'histoire du Jardin botanique municipal de cette ville, par M. Gérard, professeur à la Faculté des Sciences, avec 9 figures dans le texte et 1 planche hors texte 3 fr. 50

Physiologie comparée de la Marmotte, par Raphaël Dubois, professeur à la Faculté des Sciences, avec 119 fig. et 125 planches hors texte. . . . . 15 fr.

Etudes sur les terrains tertiaires du Dauphiné, de la Savoie, et de la Suisse occidentale, par H. Douxami, docteur ès sciences, professeur au Lycée de Lyon. 1 vol. in 8° avec 6 planches hors texte et 31 figures . . . . . 6 fr.

Recherches physiologiques sur l'appareil respiratoire des oiseaux, par J.-M. Soum, docteur ès sciences, professeur au Lycée de Bordeaux. 1 vol. in-8° avec 40 figures dans le texte . . . . . 3 fr. 50

Résultats scientifiques de la campagne du Caudan dans le golfe de Gascogne (août-septembre 1895), par R. Kœhler, professeur de zoologie à la Faculté des Sciences.

Fascicule I. 1 vol. in-8° avec 6 pl. . 6 fr.
Fascicule II. 1 vol. in-8° avec 11 pl. 6 fr.
Fascicule III. 1 vol. in-8° avec 21 pl. 20 fr

Anatomie pathologique du système lymphatique dans la sphère des néoplasmes malins, par le Dr C. Regaud, chef des travaux, et le Dr F. Barjon, préparateur d'anatomie générale et d'histologie à la Faculté de médecine (Mémoire couronné par l'Académie de médecine), avec 4 pl. hors texte . . . . . 5 fr.

Recherches stratigraphiques et paléontologiques dans le Bas-Languedoc, par Frédéric Roman, docteur ès sciences, préparateur de géologie à la Faculté, avec 40 figures dans le texte et 9 planches hors texte . . . . . 8 fr.

Etude du champ électrique de l'Atmosphère, par Georges Le Cadet, docteur ès sciences, assistant à l'Observatoire de Lyon, avec 3 figures et 10 planches dans le texte. 6 fr.

Lons. — Imp. Perrin aîné & Rey (Soc. A. Rey-Gaillard). — 17567